

DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2019.03.016

基于 SA-PSO 的风电消纳经济性动态规划分析

邱金鹏

(中国电力工程顾问集团西南电力设计院有限公司, 成都 610021)

摘要: [目的] 电网运行规划研究在电力系统中具有十分重要的地位, 对电源布局具有决策意义, 其本质上是一个多约束组合优化问题, 重点研究了风电运行成本的计算模型。[方法] 该模型对电源布局规划中需要重点考虑的约束问题进行了分析, 采用粒子群算法用于解决此类目标优化问题, 并结合模拟退火理论对传统粒子群算法进行了优化处理。[结果] 通过仿真计算, 与遗传算法及粒子群算法进行了对比分析, 证实了这种算法的优越性, 可以找到满足各种约束条件的最优电网出力方案。最后, 进一步分析了在不同风速下对风电并网运行成本影响。[结论] 该模型应用于电网规划分析是可行且有效的。

关键词: 电网规划; 风电消纳; 模拟退火; 粒子群

中图分类号: TK89; TM715

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2019)03-0092-06

Research on Dynamic Economic Dispatch of Grid-connected Wind Power Based on SA-PSO Algorithm

QIU Jinpeng

(Southwest Electric Power Design Institute Co., Ltd. of China Power Engineering Consulting Group, Chengdu 610021, China)

Abstract: [Introduction] The study of power grid operation planning plays an important role in power system and has decision-making significance for power distribution, which is a multi-constraint combinatorial optimization problem in fact. Research is mainly focused on the wind power cost calculation model. [Method] In view of various constraint conditions that generation expansion planning need to consider, particle swarm optimization (PSO) was used to solve this kind of objective optimization problem, and the traditional PSO was optimized based on simulated annealing theory. [Result] Numerical examples confirmed the superiority that can be found an optimal power output scheme to satisfy various constraints by comparison with the particle swarm algorithm and genetic algorithm. Finally, the influence on wind power grid connected operation cost under different wind speed were further analyzed. [Conclusion] It is feasible and effective to apply this model to power grid planning and analysis.

Key words: power network planning; wind power consumptive; simulated annealing; particle swarm algorithm

中国风能储量丰富, 且分布面广, 开发利用潜力巨大, 快速发展的风电产业已经取得了良好的经济效益和社会效益。如今, 中国风电总装机量已位居全球第一, 2012年风电总发电量首次超过核电, 成为中国继火电和水电之后第三大主力电源。随着风电的技术进步和应用规模的扩大, 风电成本持续下降, 经济性与常规能源已十分接近, 以风电为代表的多种能源形式并网已经成为趋势, 但是风电并

网的具体经济性调度研究仍然较少。

文献[1]在电网规划问题中考虑了新能源消纳问题, 并建立了相关的新能源消纳电网规划方法。文献[2]根据风能并网发电的特点, 分析影响风能并网发电的经济性因素, 建立风速计算模型和风电机组出力模型, 通过蒙特卡罗模拟进行算例分析。文献[3]分析了当前我国风电并网管理模式存在的主要问题, 并对需求侧响应机制进行了研究, 分别提出了针对我国市场初级、过渡以及完善阶段计及风电大规模并网的需求侧响应实施模式。文献[4]同时考虑价格型和激励型需求响应, 采用了随机模拟技术和粒子群算法相结合的求解方法, 说明结合

收稿日期: 2018-12-24 修回日期: 2019-02-20

基金项目: 中国能建规划设计集团科技项目“电力工程(系列)设计手册: 技术经济”(50-ZB2015-18-E102)

需求响应来分析风电消纳问题具有一定的研究意义。文献[5]建立了考虑用户满意度以及电价响应的电力系统调度新模型,提高了含风电电力系统运行的经济性。文献[6]中将小波分解理论与自回归模型相结合,构建了一种新的风速预测方法,为提高风速预测及风能评估精度打下基础。文献[7]建立了基于风险成本的大规模风电远距离输送的输电价综合定价模型,并以甘肃风电远距离输送为例,验证了模型的有效性。本文综合考虑风电与火电的多能源电网结构,运用基于模拟退火的粒子群算法(SA-PSO)进行最优规划,并且进一步分析了风速对运行成本的影响。

1 风火电联合运营成本模型的构建

1.1 风电并网现状分析

火力发电是目前我国电源结构的主体,虽然传统的火力发电在运行过程中相对稳定,具有电能质量好等优点,但同时消耗大量煤炭,对环境有一定破坏影响;因此,风力发电等清洁能源具有巨大的发展潜力,有利于减少污染气体的排放,随着电力技术的快速发展,风电的稳定性以及质量都有较大提高,并且达到上网需要。风火电联合运营是我国现阶段常见的传统能源和清洁能源联合运营的模式,随着人们对风电的日益关注,新型风电场的容量在并网系统中所占比例不断增加,这对传统电力系统的经济调度问题提出了新的要求,特别是风电场风速的随机变化给系统的经济调度带来了更多的不确定性因素。

因此,风火电联合运营经济调度模型所要解决的问题是,在已知机组参数等情况下,分析电网运行的多条件约束,以求得最优运行成本。首先分别构建两类机组的运行成本函数模型。

1.2 构建火力发电成本模型

火电厂在运行过程中的优化目标是,在满足负荷需求以及各运行条件的情况下,对各机组的运行状况进行合理安排,使得全厂的煤耗最低。因此,采用 (U_i, P_i) 来表示各火电机组的运行状态,其中, U_i 表示机组是否运行(1代表启动,0代表停止), P_i 代表了各机组的负荷。

全厂的火电机组的煤耗采用以下函数表示^[8]:

$$F_i = f_i(P_i(t)) = A_i P_i^2(t) + B_i P_i(t) + C_i \quad (1)$$

式中:第*i*台火电机组的煤耗特性系数采用 $A_i, B_i,$

C_i 来表示;第*i*台火电机组的煤耗采用 F_i 表示;第*i*台火电机组的煤耗方程为 $f_i(P_i(t))$;在*t*时刻,第*i*台火电机组的负荷为 $P_i(t)$ 。

设全厂正常运行的火电机组有*n*台,因此分析全厂总的燃煤耗量最小,目标函数可以设置为:

$$\min F = \min \sum_{i=1}^{i=N} F_i = \min \sum_{i=1}^{i=N} U_i F_i \quad (2)$$

当煤耗量达到最小时,所得即是最优火电成本。

1.3 构建风电运行成本

风速的不规则波动导致了风电出力的不确定性,致使有功功率波动较大。通过对某风电场在一段时间内风速数据以及风电机输出功率之间的数理关系,最后利用拟合出的风速功率曲线计算实际风速对应的功率值并与实测风速功率数据进行对比,结果表明可以由风速功率拟合结果结合风速预测值给出风电场未来出力情况。采用动态经济调度,需要每个优化时段的风电场出力数据,大多数地区平均风速的概率分布密度函数遵循 Weibull 分布^[4]:

$$f_v(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} * \exp\left[-\left(\frac{v}{c}\right)\right] \quad (3)$$

式中: v 表示实测风速; c 为风速系数,表示地区平均风速大小; k 为形状系数,表示的是风速分布密度函数的形状。

可以采用如下的分段函数对风速以及风电出力 P_f 之间的关系进行函数表示:

$$P_f = \begin{cases} 0 & (v < v_{in}, v \geq v_{out}) \\ \frac{v - v_{in}}{v_r - v_{in}} P_r & (v_{in} \leq v < v_r) \\ P_r & (v_r \leq v < v_{out}) \end{cases} \quad (4)$$

式中:风机的额定出力采用 P_r 表示;切入风速、切出风速、额定风速分别用 v_{in} 、 v_{out} 、 v_r 表示。上式典型的风电机组功率特性曲线如图1所示。

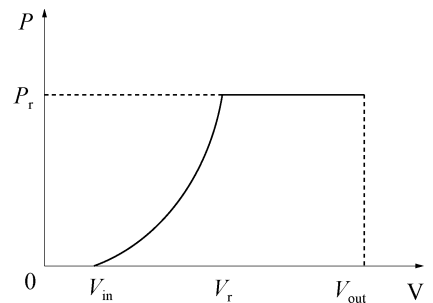


图1 典型的风电机组功率特性曲线

Fig. 1 Typical power characteristic curve of wind turbine

由式(3)和(4)得 P_f 的概率分布函数, 如式 5 所示:

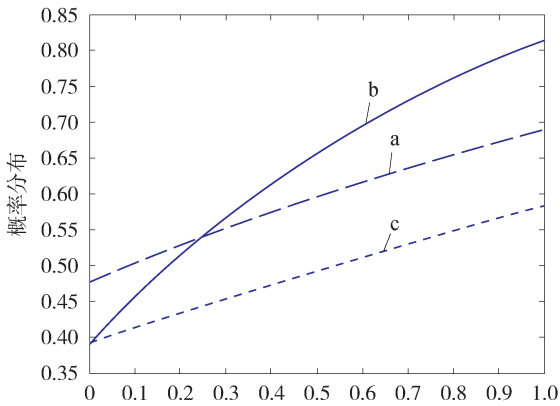
$$F_p(p_t) = P_r(P_t \leq p_t) = \begin{cases} 1 - \exp\left\{-\left[\frac{v_{in} + (v_r - v_{in}) \cdot p_t/p_r}{c}\right]\right\} + \exp\left[-\frac{(v_{out})}{c}\right] & (0 \leq p_t < p_r) \\ 0 & (p_t < 0) \\ 1 & (p_t \geq p_r) \end{cases} \quad (5)$$

设置切入风速、切出风速、额定风速分别为: 3.5 m/s、12 m/s、20 m/s, 以表 1 中在不同的尺度系数和不同的额定出力为例, 做出风电概率分布函数图, 如图 2 所示。

表 1 风电概率分布函数参数表

Tab. 1 Parameter table of wind power probability distribution function

尺度系数 c	额定出力 P_r	对应图 2 中曲线
8	1	a
6	3	b
8	3	c



注: a、b、c 三条曲线对应的参数详见表 1。

图 2 风电概率分布函数图

Fig. 2 Wind power probability distribution function diagram

考虑到风电场发电的波动性, 对风电出力盈余与风电出力不足分别进行研究, 并设 K_1 、 K_2 分别为这两种情况的运行成本系数, 可以得到风电的总发电成本可以用式(6)表示:

$$F_f = k_1 \left(\sum_{t=1}^T \right) \phi(P_w(t) < P_r(t)) \{p_r(t) - E[P(t) < P_r(t)]\} + K_2 \left(\sum_{t=1}^T \right) \phi(P_w(t) > P_r(t)) \{E[P(t) > P_r(t)] - P_r(t)\} \quad (6)$$

式中: $\phi(P_w(t) < P_r(t))$ 与 $\phi(P_w(t) > P_r(t))$ 是风电出力不足与风电出力盈余的概率计算公式; 相

对应的, 与 $E[P_w(t) < P_r(t)]$ 与 $E[P(t) > P_r(t)]$ J 则分别是它们的期望值。

2 基于 SA-PSO 的风电消纳经济性分析建模

2.1 SA-PSO 概述

基于模拟退火的粒子群算法的主要过程是: 首先随机生成初始粒子群, 开始随机搜索, 通过基本粒子群算法产生一组新的粒子群, 然后再对各个粒子群独立地进行杂交运算和带高斯变异的运算, 对所产生的个体分别进行模拟退火, 最后将得到个体作为下一代粒子群体中的个体。

在粒子群的每次进化过程中, 杂交运算是依据杂交概率 p 选择出指定数量的粒子, 并将这些粒子随机的两两杂交, 产生相同数量的粒子并以某种概率接受产生的孩子粒子替换双亲粒子。因而, 整个算法由两部分组成, 首先通过粒子群算法的进化操作产生一个较优良的粒子群; 然后将粒子群在模拟退火的环境下进行杂交和变异的进化操作。整个过程迭代反复, 直到满足终止条件。

2.2 SA-PSO 建模过程

基于 SA-PSO 的风电消纳经济性分析建模流程如下所示:

- 1) 输入系统中包含的火电站和风电场数据。
- 2) 结合电站数据以及相关运行的约束条件, 初始化群微粒, 设群体总规模为 m , 同时对各微粒的位置以及速度进行设置。对粒子群算法中的参数进行初始化, 模拟退火算法参数中的初始温度以及退火速度为 T_0 、 α 。
- 3) 利用原始数据, 结合各运行约束条件进行模拟计算, 对各方案的运行费用进行计算分析。
- 4) 对各个微粒的适应度函数值进行计算分析。
- 5) 将上述计算得到的微粒适应值与之前最好位置 P_{best} 进行比较, 如更加优化, 则将现适应值设置为目前的。
- 6) 将上述计算的 P_{best} 与全局经历的最好位置 G_{best} 进行比较, 如较好, 对 G_{best} 的索引号进行更新。
- 7) 对各粒子的速度以及位置进行更新。
- 8) 计算适应度函数值的变化量 ΔE , $\Delta E \leq 0$ 或者 $\exp(-\Delta E/T) > \text{rand}(0, 1)$, 则对新值进行更新; 否则不对微粒的位子进行改变。
- 9) 若上述新值有更新, 则进行降温处理: $T \leftarrow \alpha T$ 。

10)若函数已经趋于收敛,则计算出的当前最优解为整个函数的最优解;若函数不收敛,则返回(3)。

2.3 动态规划模型建立

电力运行规划问题具有多变量,且约束条件较多,为较复杂的目标优化问题。而采用传统的确定性目标规划方法已然不合适;因此,构建机会约束规划的方法能对随机变量进行很好的描述,包括目标函数以及约束条件。

本文在计及常规火电机组的煤耗成本的同时,加入风电发电成本,构建风电并网经济性分析模型。在此模型中需要考虑多个约束条件,包括功率平衡条件、发电运行约束、发电机爬坡速率约束。

1)功率平衡条件

$$\sum_{i=1}^N P_i(t) + P_f(t) = P(t), t = 1, 2, \dots, T \quad (7)$$

式中: $P_i(t)$ 为第 i 台机组 t 时刻的功率; $P_f(t)$ 为风电在 t 时刻的有功出力; $P(t)$ 为 t 时段的电网功率值。

2)发电运行约束

$$P_{i\min} \leq P_i(t) \leq P_{i\max} \\ 0 \leq P_f(t) \leq P_f \quad (8)$$

式中: $P_{i\min}$ 、 $P_{i\max}$ 分别为第 i 台火电机组有功出力的下限与上限; P_f 为风电机组额定有功出力。

3)发电机爬坡速率约束

$$-v_{idown} \leq P_i(t) - P_i(t-1) \leq v_{iup} \quad (9)$$

式中: $P_i(t-1)$ 为在 $(t-1)$ 时刻火电机组 i 的有功出力; v_{idown} 、 v_{iup} 为火电机组 i 有功出力的下降速度与上升速度。

4)目标函数构建

含风电场电力系统动态经济调度的目标是使系统常规发电机组发电成本最小。而本文构建了包含风电的电网规划经济性分析模型,因此得到整个电厂总发电成本目标函数为:

$$\text{Min} f_t = \sum_{i=1}^{i=N} F_i F_f \quad (10)$$

同时,以 f_t 作为 SA-PSO 模型的适应度函数,所得最优适应度即是最佳的风电、火电的调度成本。约束条件可以概括如式(7)-(10)所示。

3 实例分析

通过对某地区日负荷以及风速分布数据的基础

分析,以典型 24 h 的数据为例,其中电力负荷如图 3 所示。

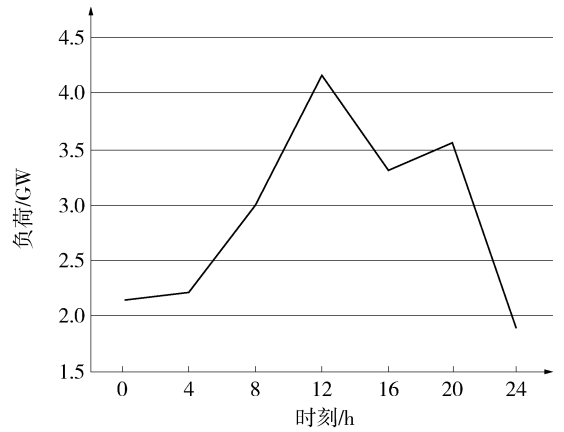


图3 电力负荷曲线图

Fig. 3 Electric load curve

假设原电网中包含了 5 台火电机组,每台机组的额定功率为 500 MW,接入一个大型的并网风电场的电力系统,该风电场的额定出力 1 GW,火电机组的其他参数如表 2 所示。

表2 火电机组参数

Tab. 2 Thermal power unit parameters

机组	有功出力下限 /pu	有功出力上限 /pu	A_i	B_i	C_i	$V_{idown}/(pu \cdot h^{-1})$	$V_{iop}/(pu \cdot h^{-1})$
1	0.60	1.5	0.135 5	36.747	978.432	-0.24	0.24
2	0.40	2.0	0.245	46.714	865.497	-0.23	0.23
3	0.50	1.5	0.035	62.821 1	204.716	-0.50	0.50
4	0.25	1.5	0.153	36.643	978.643	-0.14	0.14
5	0.30	0.8	0.035	55.740	813.712	-0.20	0.20

注:“pu”代表了额定功率系数。

3.1 SA-PSO 与其他智能算法的比较

采用引入了模拟退火的粒子群算法(GA-PSO)求解本文提出的风火电运行成本数学模型,同时与传统的粒子群算法(PSO)和遗传算法(GA)作比较,对上述的成本规划问题进行优化计算。

设置 SA-PSO 模型的参数:

1)以此地区较为典型的风力情况,设置切入风速、切出风速、额定风速分别为: 3.5 m/s、12 m/s、20 m/s。

2)最大迭代数 Iter_max = 100, 粒子数 $D = 40$, 起始温度 T_0 为 1 000、退火速度 $\alpha = 0.8$, 杂交概率和变异概率分别取 0.5 和 0.05。

3) 风电场在发电盈余与发电不足的情况下的发电运行成本系数分别为 $K_1 = 150$ 、 $K_2 = 200$ 。

对粒子群算法以及遗传算法设置相同的代数等相关参数, 使用 matlab 进行仿真训练, 当达到最大迭代次数时输出运行结果, 三种算法的适应度曲线如图 4 所示。

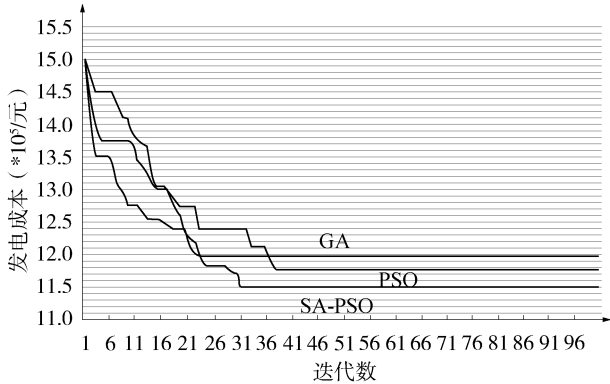


图 4 三种算法的适应度曲线

Fig. 4 Fitness curves of the three algorithms

观察上图可得, 发电成本随着粒子群寻优过程不断降低, SA-PSO 当在第 30 次迭代时适应度曲线基本已经达到平稳, 当系统模拟结束后, 三种算法的仿真结果如表 3 所示。

表 3 模拟仿真结果

Tab. 3 Simulation results

模型	所用时间/s	达到最优迭代数	最优运行成本/万元
SA-PSO	105.92	31	114
PSO	103.72	37	117
GA	140.30	21	120

由表 3 可得, SA-PSO 与 PSO 模型在运算效率上显著快于 GA 算法, 而通过引入模拟退火的粒子群算法与传统粒子群算法的效率并没有多大的差别, 但是所得到的最优运行成本可以进一步降低, 达到最低的最优的 114.8 万元。通过 SA-PSO 模型仿真得到的风电机组与 5 个火电机组的最优计划出力如图 5 与表 4 所示。

风电机组的计划出力在其中较多时点都大于火电机组, 分析其中原因可认为是在模型中考虑了风电出力盈余与不足的情况, 可以更加有效地控制风电成本, 因而在模型中也体现了在约束条件下可以优先使用风电。整个电网在正午与晚上的出力普遍较大, 这是因为此时的电网需求负荷最大, 与实际

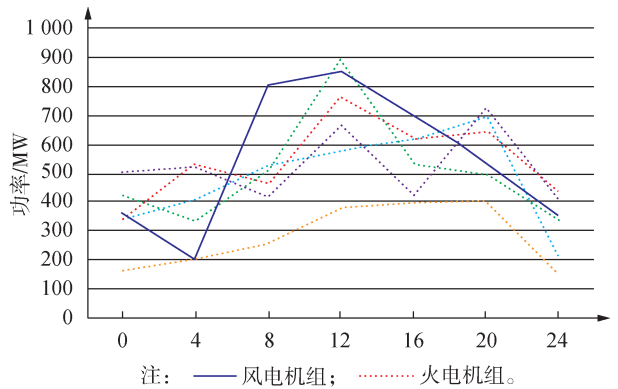


图 5 最优计划出力图

Fig. 5 Optimal planning effort

表 4 风电机组与火电机组最优计划出力

Tab. 4 Optimal planned output of wind and thermal power units

时刻	H_1 /pu	H_2 /pu	H_3 /pu	H_4 /pu	H_5 /pu	F /pu
2	0.79	0.71	0.86	0.56	0.31	0.30
4	0.89	0.56	0.87	0.69	0.34	0.21
6	0.73	0.77	0.59	0.77	0.50	0.43
8	0.77	0.85	0.70	0.88	0.44	0.81
10	0.94	1.05	0.92	0.91	0.51	0.85
12	1.29	1.50	1.12	0.97	0.64	0.86
14	1.21	1.21	0.87	1.01	0.64	0.80
16	1.04	0.89	0.71	1.03	0.67	0.70
18	1.07	0.90	1.05	1.17	0.50	0.65
20	1.09	0.84	1.22	1.17	0.67	0.55
22	0.87	0.71	0.90	0.61	0.34	0.47
24	0.72	0.57	0.69	0.34	0.25	0.35

注: H_i 代表火电机组; F 代表系统中的风电机组; pu 代表额定功率系数。

情况相符。观察风电曲线可得, 在凌晨 4 点左右风电出力达到最小, 且小于火电出力, 这不仅与整个电网的负荷较低相关, 还与此时的风速达到了低谷状态, 相反情况下, 在白天正午或者下午风电达到了高数值。

3.2 风速对风火电联合运行成本的影响

为使得含风电场电力系统的发电成本最小, 必须考虑到风速的波动性, 而风电场出力具有不确定性, 进而导致运行费用也具有不确定性, 因此风速对引入风电的电网系统的运行成本也是一个不能忽略的重要因素。风速与风机输出功率之间满足以下关系:

$$W(V) = \frac{1}{2} \rho A V^3 C \quad (11)$$

式中: V 是风速; A 是风轮面积; ρ 是空气密度; C 是风轮的功率系数。

使用 SA-PSO 模型对不同风速下风火电运行成本的进行仿真训练, 控制模型参数保持不变, 只观察平均风速等比例变化(即对 24 h 的风速等比例变化)对系统的影响, 结果如表 5 所示。

表 5 不同风速下的模拟结果

Tab. 5 Simulation results at different wind speeds

平均风速 $\bar{v}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	风电发电量/MWh	最优运行成本/ $\times 10^5$ 元
4.7	352.76	13.7
5.4	413.28	11.4
6.2	435.26	10.2
8.3	472.53	9.8

从表 5 的计算结果可以发现, 随着风速的增大, 风电的发电量不断增加, 风火电混合电力系统的运行成本呈下降趋势, 进一步分析可以认为在模型中引入了风力盈余与风力不足不同情况下的运行成本, 使得风电场的度电成本比常规火电机组低, 在这种情况下系统在做经济调度计划时便倾向于让风电场多发电以达到最优运行成本, 因此当风速越大, 风电成本越低。

4 结论

本文在对风电以及火电等多能源结构的发电模型进行研究后, 对风电发电成本进行分析, 充分考虑了风电盈余与不足的情况, 提出了基于风速的风电成本计算公式, 结合火电的典型成本模型, 构建风电并网的发电成本。为了进一步分析电网的经济性规划, 引入了基于模拟退火的粒子群算法来处理这类动态规划问题。实例计算表明了应用 SA-PSO 算法对电网出力规划进行分析能很好的达到收敛效果, 并且在相同条件下比遗传算法与传统粒子群算法能得到更优的电网运行成本。最后, 对比分析了随着风速的增加, 系统运行成本也会相应降低, 这可以为风电场及电网运行调度人员提供有效的决策信息。

参考文献:

[1] 彭波, 陈旭, 徐乾耀, 等. 面向新能源消纳的电网规划方法初探 [J]. 电网技术, 2013, 37(12): 3386-3391.
PENG B, CHEN X, XU Q Y, et al. Preliminary research on power grid planning method aiming at accommodating new energy [J]. Power System Technology, 2013, 37 (12): 3386-3391.

[2] 陈东, 雷金勇. 南方电网风电功率预测系统应用扩展研究 [J]. 南方能源建设, 2015, 2(3): 28-33.
CHEN D, LEI J Y. Research on the flexible performance of wind power forecast system in China southern power grid [J]. Southern Energy Construction, 2015, 2(3): 28-33.

[3] 曾鸣, 李晨, 陈英杰, 等. 风电大规模并网背景下我国电力需求侧响应实施模式 [J]. 华东电力, 2012, 40(3): 363-367.
ZENG M, LI C, CHEN Y J, et al. Implementation mode of power demand side response to large-scale wind power integrated grid in China [J]. East China Electric Power, 2012, 40(3): 363-367.

[4] 艾欣, 刘晓. 基于需求响应的风电消纳机会约束模型研究 [J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2011, 38(3): 17-622+35.
AI X, LIU X. Chance constrained model for wind power usage based demand response [J]. Journal of North China Electric Power University, 2011, 38(3): 17-622+35.

[5] 别朝红, 胡国伟, 谢海鹏, 等. 考虑需求响应的含风电电力系统的优化调度 [J]. 电力系统自动化, 2014, 38(13): 115-120+159.
BIE Z H, HU G W, XIE H P, et al. Optimal dispatch for wind power integrated systems considering demand response [J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(13): 115-120+159.

[6] 陈雷, 卢斯煜. 风电场出力特性与集群效应分析方法研究 [J]. 南方能源建设, 2017, 4(1): 31-37.
CHEN L, LU S Y. Research on the analysis method for wind power generating output characteristic and cluster effects [J]. Southern Energy Construction, 2017, 4(1): 31-37.

[7] Mellit A, Pavan A M A. 24-h forecast of solar irradiance using artificial neural network; application for performance prediction of a grid-connected PV plant at TRIESTE, ITALY [J]. Solar Energy, 2010, 84(8): 807-821.

[8] LEWINGTON Ilka, 潘登. 海上风电并网的经济调控——将欧洲经验应用于中国(下) [J]. 南方能源建设, 2018, 5(3): 8-18.
Ilka LEWINGTON, PAN D. Economic regulation of network connection of offshore wind; applying european experience to China: part II [J]. Southern Energy Construction, 2018, 5(3): 8-18.

作者简介:



邱金鹏(通信作者)

1991-, 男, 四川成都人, 工程师, 硕士, 主要研究方向为电力技术经济(email)1550872694@qq.com。

QIU J P