

电网安全和调度公平性的新能源发电计划研究

郭元萍, 徐敏, 郭祚刚, 谈赢杰, 李义

引用本文:

郭元萍, 徐敏, 郭祚刚, 等. 电网安全和调度公平性的新能源发电计划研究[J]. 南方能源建设, 2021, 8(2): 71-77.

GUO Yuanping, XU Min, GUO Zuogang, et al. Research on New Energy Generation Scheduling for Grid Security and Scheduling Fairness[J]. *Southern Energy Construction*, 2021, 8(2): 71-77.

相似文章推荐 (请使用火狐或IE浏览器查看文章)

Similar articles recommended (Please use Firefox or IE to view the article)

中国煤电机组调峰运行现状分析

Analysis on Peak Load Regulation Status Quo for Coal-fired Power Plants in China

南方能源建设. 2017, 4(1): 18-24 <https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2017.01.003>

电池储能系统对微电网运行特性的改善作用研究

Operation Performances Enhancement of Micro-grid by Battery Energy Storage System

南方能源建设. 2015, 2(2): 35-40 <https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2015.02.006>

基于DIGSILENT的风光储微电网系统对电网安全稳定影响分析

Influence of Microgrid Containing Wind Photovoltaic and Storage on Power Grid Security and Stability Using DIGSILENT

南方能源建设. 2018, 5(z1): 1-6 <https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2018.S1.001>

基于关键链的发电设计项目进度优化

Optimization of Scheduling in Power Generation Engineering Projects Based on Critical Chain

南方能源建设. 2016, 3(1): 70-75 <https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2016.01.015>

天然气网络对含新能源电力系统短期调度运行影响

Impact of Natural Gas System on Short-term Scheduling with Volatile Renewable Energy

南方能源建设. 2019, 6(1): 1-7 <https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2019.01.001>

电网安全和调度公平性的新能源发电计划研究

郭元萍^{1,✉}, 徐敏², 郭祚刚², 谈赢杰², 李义¹

(1. 贵州电网有限责任公司毕节供电局, 毕节 551700; 2. 南方电网科学研究院有限责任公司, 广州 510663)

摘要: [目的] 随着风电场、光伏电站不断并网, 地区电网网架结构发展跟不上新能源机组容量的增长速度, 多能源混合的特点以及断面分层的特征给日前发电计划制定带来困难, 为此提出一种考虑断面安全约束和调度公平性的多层次多能源日前发电计划方法。[方法] 一是深度优先搜索越限断面, 二是提出基于信息熵的出力受限分配策略, 利用经济学领域中信息熵的概念指导评价调度公平性的量化指标, 构造一种公平性计算方法。[结果] 在保证断面潮流接近稳定极限的情况下, 合理公平进行各个电厂的有功功率分配, 实现电网安全稳定运行条件下的风光资源充分利用。[结论] 通过某地区电网实际算例进行验证, 该方法可以解决目前新能源发电计划制定存在的问题, 具有很好的实际应用价值。

关键词: 安全约束; 调度公平性; 发电计划; 出力受限

中图分类号: TM7; TM73

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2021)02-0071-07

开放科学(资源服务)二维码:



Research on New Energy Generation Scheduling for Grid Security and Scheduling Fairness

GUO Yuanping^{1,✉}, XU Min², GUO Zuogang², TAN Yingjie², LI Yi¹

(1. Bijie Power Supply Corporation of Guizhou Power Grid Co., Ltd., Bijie 551700, China;

2. Electric Power Research Institute, CSG, Guangzhou 510663, China)

Abstract: [Introduction] With incessant grid-connection of wind farms and photovoltaic power stations, the development of regional power grid structure cannot keep pace with the growth rate of new energy unit capacity, characteristics of multi-energy mix and hierarchical features of section bring difficulties to the formulation of day-ahead generation scheduling, for this reason, a method for multi-level and multi-energy day-ahead generation scheduling considering the safety constraint of the section and the fairness of dispatch was proposed. [Method] This paper presented a depth-first search for the restricted section, and proposed an output limitation allocation strategy based on information entropy. A fairness calculation method was constructed by using the concept of information entropy in economics to guide the quantitative indicators for evaluating scheduling fairness. [Result] Under the circumstances of ensuring that the cross-sectional current is close to the stability limit, the active power of each power plant is distributed reasonably and equitably, thereby realizes the full utilization of wind and solar resources. [Conclusion] Through a practical example of a regional power grid, it is proved that this method can solve the existing problems in new energy day-ahead generation scheduling and has good practical application value.

Key words: safety constraints; dispatch fairness; generation scheduling; output limitation

2095-8676 © 2021 Energy China GEDI. Publishing services by Energy Observer Magazine Co., Ltd. on behalf of Energy China GEDI. This is an open access article under the CC BY-NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

随着新能源迅速发展^[1], 地区电网调度管辖范围内的风电场和光伏电站愈来愈多。新能源并网形成输电断面嵌套分层结构, 正常运行方式下可能存

在断面越限, 在电网检修方式或电网N-1事故情况下, 断面越限更加严重, 导致新能源出力受限时出现不合理弃风、弃光的现象。多能源混合和输电断面的嵌套分层结构特征给日前发电计划制定带来困难^[2-3]。风力发电具有很强的随机性和波动性^[4],

光伏在夜间不具备发电条件,仅在白天发电,具有明显的间歇性。风电和光伏为主的多能源并网,其出力特性不同,使得各风电场和光伏电站功率如何公平分配成为一个难点。

文献[5]以调度工作评价分数作为分配新能源出力的依据,以弃风率和弃光率一致作为衡量调度公平性的指标,提出了新能源弃风率、弃光率基本一致的两阶段双层次调度新方法。文献[6]提出一种大规模风电分层断面的实时有功控制方法,实现各风电场发电能力的转移。文献[7]基于大规模风电接入的情况,提出一种发电计划两阶段优化的方法,第一阶段为不严格保证电力平衡的无约束期望计划编制,第二阶段以常规机组发电计划偏差成本和风电弃风成本优化目标。文献[8]建立了全周期变时段优化模型,提出约束自适应选择策略。文献[9]提出现有“三公”调度评价指标存在的问题及改进思路,并提出一种考虑煤价波动的评价指标。文献[10]定义了修正后的合同电量完成率,提出基于修正加权变异系数的合同电量执行公平性指标。文献[11]在制定了调度公平性评价原则的基础上,从主题、管理、业务三个维度构建了一种新的调度公平性评价指标体系。文献[12]兼顾系统运行公平与经济性,提出一种将基尼系数作为约束条件,将发电成本作为目标函数的“三公”调度模型。

本文利用深度搜索越限断面的方法,从内层到外层的优先级顺序逐步降低进行搜索,保证断面不超过稳定极限,计算出新能源场站所能发电的最大空间。提出基于信息熵^[13]的公平性调度出力分配策略,利用经济学领域中信息熵的概念指导评价调度公平性的量化指标^[14],构造一种公平性计算方法,计算出受限断面下相关电厂的出力受限分配权重和系数,在保证断面潮流接近稳定极限的情况下,合理公平进行各个电厂的有功功率分配。

1 方法概述

多能源混合的电厂日前发电计划需要考虑输电断面的安全约束,根据可就地消纳的负荷预测、输电断面的输送能力等因素,计算断面安全约束条件下的风电场和光伏电站的可接纳空间,当该断面下各个电厂的发电预测功率超过该接纳空间时,输电

断面越限,需对风电和光伏的发电计划进行出力限制。

在保证所有断面功率不越限的情况下,使断面得到最大化利用,实现各光伏、风电最大化消纳。本文提出一种新方法,包括深度搜索越限断面和多能源调度公平性的出力受限分配,基本思路是:(1)电厂初始分配的日前发电计划功率均以其出力预测为准,采用深度优先搜索越限断面的方法,从内层到外层的优先级顺序逐步降低进行搜索,计算该断面下电厂发电的最大空间和出力受限值;(2)基于熵值法计算同一越限断面下各电厂的出力受限分配权重得分,对各电厂重新进行有功功率的计算。该方法主要特点在于:(1)不存在剩余调节功率重新分配的情况,每个断面仅进行一次有功功率控制;(2)充分利用了新能源送出断面,同时保证了各个风电场和光伏电站出力受限的公平分配。

2 数学模型

假设某风电和光伏混合的新能源输电断面由分层嵌套的多个输电线路组成,如图1所示,其对应的变电站母线接有风电场、光伏电站和用电负荷,无储能装置,电厂未接入AGC控制。最外层的是断面1和断面2,处于第2层的是断面3,处于第3层的是断面4,处于第4层的是断面5。

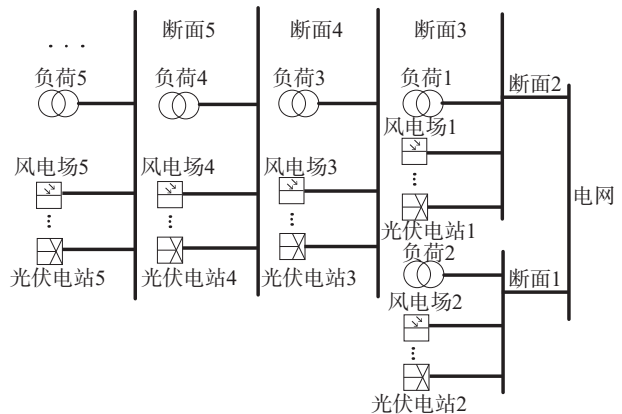


图1 某输电断面结构图

Fig. 1 Structure of a transmission section

系统目标是保证各个断面满足安全约束条件,且各个断面机组出力按最大可接纳空间进行分配。

设某*i*断面相关的电厂总出力优化目标为 P'_{i-g} ,优化目标函数可表达为:

$$\max (P'_{i-g}) = f (P'_{i-f}, P'_{i-c}, \beta_i) \quad (1)$$

等式约束条件为:

$$P'_{u-f} = \sum_i^n P_{u-f}, i = 1, 2, 3 \dots n \quad (2)$$

$$P'_{u-c} = \sum_i^n \sum_{j=1}^m P_{u-j-c}, j = 1, 2, 3 \dots m, i = 1, 2, 3 \dots n \quad (3)$$

不等式约束条件为:

$$P'_{u-g} \leq P_{i-\max} + P'_{u-f} \quad (4)$$

式中: f 为算法规则; P'_{u-f} 为 i 断面相关变电站 (当前断面及子断面) 在 t 时刻总的负荷预测; P_{u-f} 为 i 断面当前变电站在 t 时刻的负荷预测; P'_{u-c} 为 i 断面相关电厂在 t 时刻的总出力预测; P_{u-j-c} 为 i 断面 j 电厂在 t 时刻的出力预测; β_i 为 i 断面的深度系数; $P_{i-\max}$ 为 i 断面的有功限值。

3 出力优化算法

断面出力优化算法流程如图 2 所示。根据调度相关规定可直接将电厂出力预测作为分配初始值, 达到新能源最大化消纳的目的。

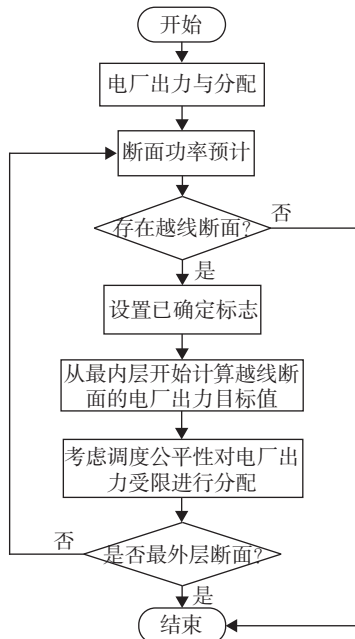


图 2 算法流程示意图

Fig. 2 Flow chart of the algorithm

i 断面相关电厂出力分配后和相关变电站负荷预测进行计算, 预计断面功率 $P_u = P'_{u-g} - P'_{u-f}$, 采用深度优先搜索算法, 从内层到外层的优先顺序校验所有断面, 从而搜索越限的断面, 若不满足 $P_u \leq P_{i-\max}$, 则将断面目标功率设置为 $P_{i-\max}$, 电厂出力目标值设置为 $P_{i-\max} + P'_{u-f}$, 计算出越限断面最内层所需

限制的出力, 按考虑调度公平性的出力受限分配方法对该断面下相关的电厂进行出力限制, 达到有功功率重新分配的目的。

每一次控制断面功率后, 根据各电厂分配的最新出力, 重新计算各断面功率, 用相同的方法再次校验是否存在越限断面。

4 出力受限分配策略

本文提出基于信息熵的公平性调度出力受限分配策略, 利用经济学领域中信息熵的概念指导评价调度公平性的量化指标, 构造公平性计算方法, 计算出受限断面下相关电厂的出力受限分配系数。

将电厂的出力预测准确率、装机容量、合同电量完成率、发电设备利用小时数四个指标要素纳入调度公平性指标。将出力预测准确率纳入负向指标, 将装机容量、合同电量完成率和发电设备利用小时数纳入正向指标, 当断面超稳定极限时, 负向指标越低, 电厂出力受限程度也就越高, 而正向指标值越大, 对出力受限的贡献就越大。

风电和光伏昼夜发电的不同特征可由设备利用小时数体现, 风力发电不分昼夜, 夜间光伏不发电, 给风电留出了裕度, 因此将设备利用小时数作为调度公平性指标, 在白天时段光伏可多留一定裕度, 合理利用风光资源。电厂出力预测作为日前发电计划的计算基础, 其准确率直接影响到出力受限分配的准确性, 因此将出力预测准确率纳入调度公平性指标。装机容量作为日前发电计划的边界条件, 装机容量较大时, 出力受限程度相应增加。合同电量完成率作为电厂考核的指标之一, 在断面越限进行出力受限时, 合同电量完成率较低的电厂可适当少限制出力。

4.1 指标无量纲化

指标无量纲化将各指标进行标准化处理^[15-16], 本文选择极值法, 如式 (5) 和式 (6) 所示:

对于正向指标:

$$x'_{ijz} = \frac{x_{ijz} - m_{iz}}{M_{iz} - m_{iz}} \times 10 \quad (5)$$

对于反向指标:

$$x'_{ijz} = \frac{M_{iz} - x_{ijz}}{M_{iz} - m_{iz}} \times 10 \quad (6)$$

式中: x_{ijz} 为 i 断面 j 电厂的 z 指标; m_{iz} 为 i 断面 j 电厂中最小的 z 指标; M_{iz} 为 i 断面 j 电厂中最大的 z 指标。

4.2 熵值法

计算*i*断面相关电厂*z*指标下*j*电厂的特征比重。

$$p_{ijz} = \frac{x'_{ijz}}{\sum_{j=1}^m x'_{ijz}} \quad (7)$$

熵值计算：

$$e_{iz} = -\frac{1}{\ln n} \sum_{j=1}^m p_{ijz} \ln(p_{ijz}), 0 \leq e_{iz} \leq 1 \quad (8)$$

差异性系数计算：

$$g_{iz} = 1 - e_{iz} \quad (9)$$

确定评价指标的权重 w_{iz} ：

$$w_{iz} = \frac{g_{iz}}{\sum_{z=1}^Z g_{iz}}, z = 1, 2, 3, \dots, Z \quad (10)$$

计算综合得分：

$$s_{ij} = \sum_{z=1}^Z w_{iz} p_{ijz} \quad (11)$$

计算出力受限：

$$X_{ij} = K_i \times \frac{s_{ij} \times P_{i-j-c}}{\sum_{j=1}^m s_{ij} \times P_{i-j-c}} \quad (12)$$

式中： K_i 为*i*断面需受限的出力； X_{ij} 为*i*断面*j*电厂受限的出力。

5 算例验证

以某实际区域的110 kV电网断面结构为算例进行分析，如图3所示。电厂1和电厂3为风电，电厂2为光伏，总装机容量为197 MW，变电站所供负荷多为居民用电，负荷较轻，就地消纳能力较弱。网架结构为环网线路，本文计算分析时将上级电网到变电站3的线路作为开口点，此时新能源场站均通过断面1并入主网，断面1、断面2、断面3的线路有功限值为90 MW，断面4为100 MW。深度优先搜索越限的断面，以断面功率接近稳定极限值运行，最终保证所有断面不超稳定极限，达到断面的最大化利用。

越限断面下相关电厂的综合得分是四个指标对出力受限的综合影响，电厂得分越高，出力受限程度越高。将表1中出力预测准确率、装机容量、合同电量完成率、发电设备利用小时数四个调度公平性指标进行熵值法计算，得出每个断面下各个电厂的综合得分。

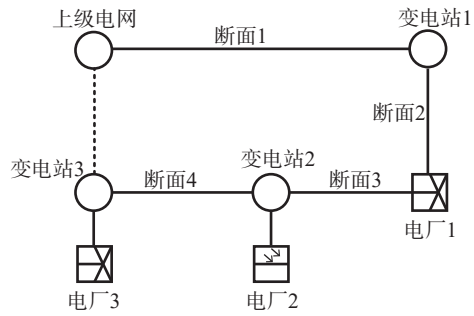


图3 某实际电网断面结构

Fig. 3 Structure of the transmission section of an actual power grid

表1 各断面电厂出力受限权重表

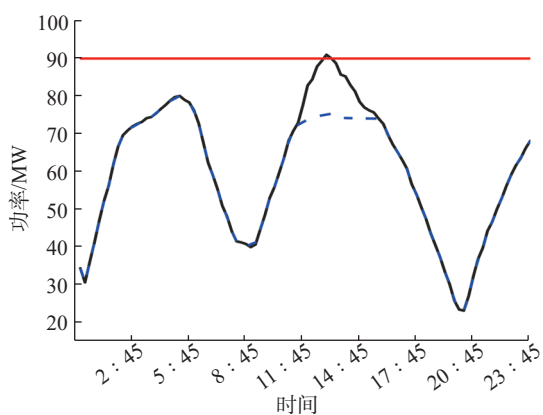
Tab. 1 Weight table of output limitation of power plant for each section

所属断面	新能源场站	出力预测准确率/%	装机容量/MW	合同电量完成率/%	发电设备利用小时数/h	综合得分
断面1/断面2	电厂1	80.34	48	36.23	1 066.58	9.81
	电厂2	91.49	50	36.34	501.37	1.25
	电厂3	97.50	99	42.77	986.00	5.56
断面3	电厂2	91.49	50	36.34	501.37	2.501
	电厂3	97.50	99	42.77	986.00	7.501
断面4	电厂3	97.50	99	42.77	986.00	10.0

注：单一电厂分值取10。

首先将各电厂发电计划初始值设置为出力预测值，断面功率初始值也由电厂的出力预测值计算，从内层到外层的优先顺序搜索越限断面，判断出断面3、断面2、断面1越限，如图4至图7所示。从最内层即断面3开始重新分配出力，保持断面接近稳定极限值，同一个电厂可属于不同断面，多个断面功率进行控制时，一个电厂存在多次出力受限分配的情况。各断面控制后的功率如图4至图7所示，断面1、3、4均运行在初始功率的下方，断面2在出力受限时稳定在极限值运行，整体实现了对输电断面的最大化利用。

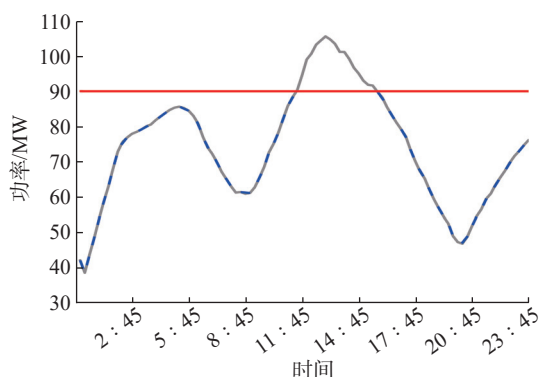
根据表1综合得分计算出各电厂受限的出力，如表2所示，仅列举新能源出力受限的时段，考虑调度公平性与考虑装机容量相比较，光伏电站在白天时段限制的有功功率有所减少，风电受限出力有所增加。白天时段风电给光伏留出一点裕度，夜间光伏不发电，风电可占用光伏的全部发电空间，一定程度上合理利用了风光资源，体现了多能源电厂出力受限的调度公平性。各电厂最终发电计划曲线



注: —— 初始功率; - - 断面控制后的功率; —— 功率限值。

图 4 断面 1 功率曲线

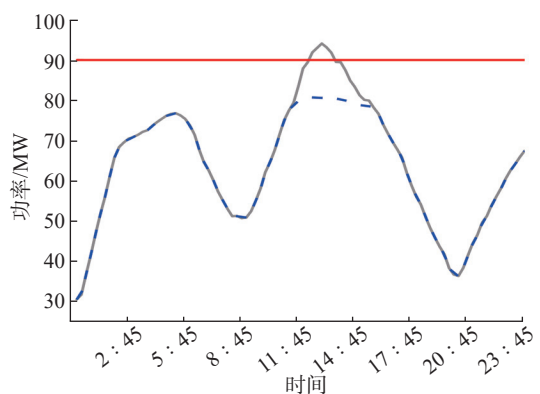
Fig. 4 Power curve of the section 1



注: —— 初始功率; - - 断面控制后的功率; —— 功率限值。

图 5 断面 2 功率曲线

Fig. 5 Power curve of the section 2



注: —— 初始功率; - - 断面控制后的功率; —— 功率限值。

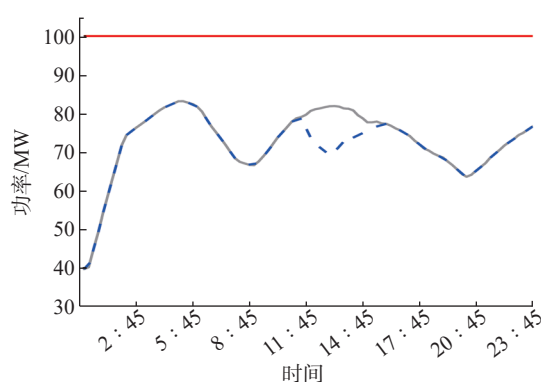
图 6 断面 3 功率曲线

Fig. 6 Power curve of the section 3

如图 8 至图 10 所示。

6 结 论

本文提出从内层到外层的优先级顺序逐步降低



注: —— 初始功率; - - 断面控制后的功率; —— 功率限值。

图 7 断面 4 功率曲线

Fig. 7 Power curve of the section 4

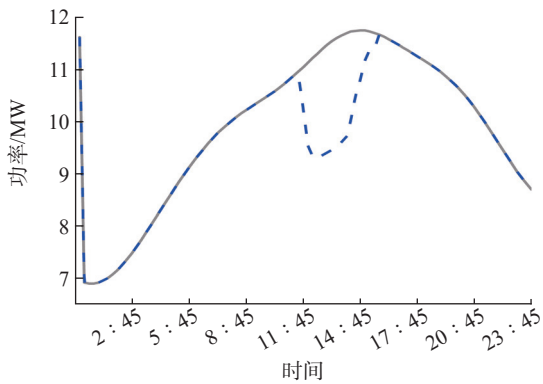
表 2 各断面电厂出力受限情况

Tab. 2 Table of output limitation of power plant for each section

时间	电厂 1 受限		电厂 2 受限		电厂 3 受限	
	出力/MW		出力/MW		出力/MW	
	按装机 容量	考虑调度 公平性	按装机 容量	考虑调度 公平性	按装机 容量	考虑调度 公平性
11:30	0.02	0.05	0.04	0.02	0.26	0.24
11:45	0.23	0.78	0.53	0.22	3.67	3.43
12:00	0.47	1.59	1.12	0.47	7.44	6.97
12:15	0.55	1.88	1.34	0.56	8.77	8.22
12:30	0.59	2.01	1.69	0.78	10.93	10.43
12:45	0.60	2.03	1.87	0.89	11.94	11.48
13:00	0.60	2.06	2.05	1.01	12.93	12.51
13:15	0.61	2.09	1.90	0.91	12.20	11.72
13:30	0.62	2.11	1.71	0.78	11.13	10.57
13:45	0.60	2.05	1.38	0.57	9.18	8.54
14:00	0.61	2.06	1.36	0.56	9.18	8.52
14:15	0.51	1.71	1.10	0.46	7.59	7.03
14:30	0.37	1.25	0.78	0.32	5.51	5.09
14:45	0.29	0.96	0.58	0.24	4.21	3.88
15:00	0.17	0.58	0.33	0.13	2.52	2.31
15:15	0.11	0.35	0.19	0.08	1.53	1.40
15:30	0.09	0.31	0.16	0.07	1.37	1.25

搜索越限断面的算法模型, 提出基于信息熵的出力受限分配策略, 为解决复杂断面和混合新能源发电调度控制难题提供了新方法, 实现了断面最大化利用和清洁能源最大化消纳, 同时也保证了电厂日前发电计划的公平性, 具有较强的实用意义。

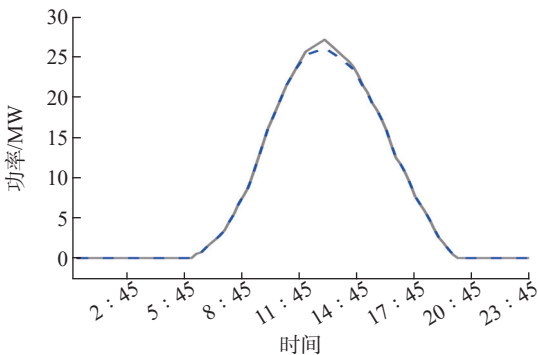
该方法已实际应用于某地区电网日前 96 时段发电计划, 取得较好的日前发电计划结果, 但仍需进一步完善新能源混并网发电的调度公平性指标



注: —— 出力预测; - - 日前发电计划。

图8 电厂1功率曲线

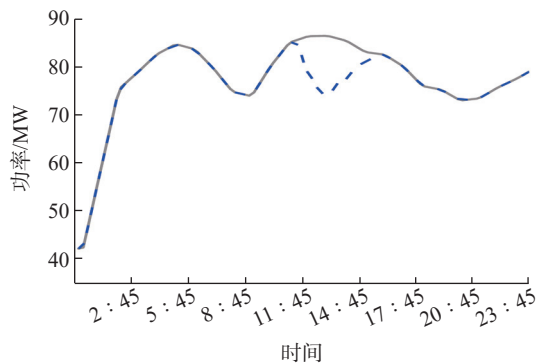
Fig. 8 Power curve of power plant 1



注: —— 出力预测; - - 日前发电计划。

图9 电厂2功率曲线

Fig. 9 Power curve of power plant 2



注: —— 出力预测; - - 日前发电计划。

图10 电厂3功率曲线

Fig. 10 Power curve of power plant 3

体系。在后续的研究工作中,可以契合未来电力市场发展方向,进一步建立包括发电成本及电力市场机制等在内的调度公平性指标体系。

参考文献:

[1] 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 Q, WANG N B, HE S E, 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.

[2] 李天权,刘琦,赵洁,等. 基于断面安全约束的高渗透率风光-水电有功控制策略[J]. 智慧电力,2018,46(11):33-39+58.

LI T Q, LIU Q, ZHAO J, et al. Active power control strategy for power grid with high permeability wind-solar-hydro based on cross-section safety constraints [J]. Smart Power, 2018, 46(11): 33-39+58.

[3] 褚云龙,李秋芳,马晓伟,等. 考虑复杂级联断面的多能源协调优化技术及应用[J]. 电网技术,2020,44(10):3656-3662.

CHU Y L, LI Q F, MA X W, et al. Technology and application of multi-energy coordinative optimization with complex cascade transmission section [J]. Power System Technology, 2020, 44(10): 3656-3662.

[4] 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 effect [J]. Southern Energy Construction, 2017, 4(1): 31-37.

[5] 代江,唐建兴,单克,等. 电网安全和调度公平性的新能源调度方法研究[J]. 贵州电力技术,2017,20(5):4-8.

DAI J, TANG J X, SHAN K, et al. Research on new energy dispatching method for grid security and scheduling fairness [J]. Guizhou Electric Power Technology, 2017, 20(5): 4-8.

[6] 卓峻峰,金学洙,邓波,等. 考虑断面安全约束的大规模风电有功控制[J]. 电网技术,2015,39(4):1014-1018.

ZHUO J F, JIN X Z, DENG B, et al. An active power control method of large-scale wind farm considering security constraints of tie lines [J]. Power System Technology, 2015, 39(4): 1014-1018.

[7] 李利利,涂孟夫,丁恰,等. 适应大规模风电接入的发电出力计划两阶段优化方法[J]. 电力系统自动化,2014,38(9):48-52.

LI L L, TU M F, DING Q, et al. Two-stage optimization method for generation output scheduling with large-scale wind power integration [J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(9): 48-52.

[8] 杨争林,唐国庆. 全周期变时段“三公”调度发电计划优化模型[J]. 电网技术,2011,35(2):132-136.

YANG Z L, TANG G Q. A generation scheduling optimization model suitable to complete period and variable intervals and conforming to principles of openness, equity and justice [J]. Power System Technology, 2011, 35(2): 132-136.

[9] 魏学好,胡朝阳,杨莉. 对“三公”调度现有评价指标的思考和建设[J]. 电力系统自动化,2012,36(20):109-112.

WEI X H, HU C Y, YANG L. Review and suggestions on present evaluation indicators of "Three-Govern" dispatch [J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(20): 109-112.

[10] 张成刚, 王秀丽. 基于修正加权变异系数的电力调度公平性指标 [J]. 电力技术经济, 2009, 21(5): 5-9+36.

ZHANG C G, WANG X L. Impartiality indexes of powpower dispatching based on modified weighed coefficient of variation [J]. Electric Power Technologic Economics, 2009, 21(5): 5-9+36.

[11] 赵翔宇, 安成, 姚刚, 等. 我国电力市场改革的调度公平性评价指标体系研究 [J]. 电力大数据, 2018, 21(3): 44-50.

ZHAO X Y, AN C, YAO G, et al. Research on power dispatching fairness evaluation index system adapted to the power market reform in our country [J]. Power Systems and Big Data, 2018, 21(3): 44-50.

[12] 赵适宜, 李正文, 丁鹏, 等. 基于基尼系数的“三公”调度模型研究 [J]. 水利水电技术, 2019, 50(4): 212-219.

ZHAO S Y, LI Z W, DING P, et al. Research on impartiality and openness of power dispatching model based on gini coefficient [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2019, 50(4): 212-219.

[13] SHANNON C E. A mathematical theory of communication [J]. Bell System Technical Journal, 1948, 27(4): 623-656.

[14] 柯人观, 黄民翔, 徐辰婧. 基于信息熵的电力调度公平性指标探讨 [J]. 华东电力, 2012, 40(6): 1060-1063.

KE R G, HUANG M X, XU C J. Impartiality index of power dispatching based on information entropy [J]. East China Electric power, 2012, 40(6): 1060-1063.

[15] 贾艳红, 赵军, 南忠仁, 等. 基于熵权法的草原生态安全评价——以甘肃牧区为例 [J]. 生态学杂志, 2006, 25(8): 1003-1008.

JIA Y H, ZHAO J, NAN Z R, et al. Ecological safety assess-

ment of grassland based on entropy area: a case study of Gansu pastoral [J]. Chinese Journal of Ecology, 2006, 25(8): 1003-1008.

[16] 黄楚珩, 蒋志云, 杨志广, 等. 基于熵值法和层次分析法的广东省水资源安全评价及影响因素分析 [J]. 水资源与水工程学报, 2019, 30(5): 140-147.

HUANG C H, JIANG Z Y, YANG Z G, et al. Evaluation and factors of water resource security of Guangdong province using entropy value and analytic hierarchy process methods [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2019, 30(5): 140-147.

作者简介:



郭元萍

郭元萍 (通信作者)

1990-, 女, 贵州毕节人, 工程师, 中南大学电气工程及其自动化学士, 主要从事地区电网运行方式工作 (e-mail) guoyuanping1990@163.com。

徐敏

1988-, 男, 江苏淮安人, 高级工程师, 华南理工大学电力系统及其自动化博士, 研究方向为新能源与微电技术、配电网规划 (e-mail) xumin@csg.cn。

郭祚刚

1985-, 男, 湖南永州人, 高级工程师, 浙江大学动力工程及工程热物理博士, 研究方向为新能源与综合能源技术、压缩空气储能技术 (e-mail) guozg@csg.cn。

(责任编辑 郑文棠)

广 告

- 广州珠江LNG电厂二期骨干支撑调峰电源项目..... 封一
- 国内首套M701J型高效联合循环发电工程助力粤港澳大湾区碳中和..... 封二
- 广东省首个电厂侧分散式风电项目落户红海湾电厂..... 封三
- 中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司..... 封四