

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.201412

区域风光集群断面裕度分配策略研究

姚刚¹, 熊国江², 张靖², 石珂¹, 伍仕红¹

(1. 贵州电网有限责任公司电力调度控制中心, 贵州 贵阳 550002; 2. 贵州大学电气工程学院, 贵州 贵阳 550025)

摘要: 为适应高占比可再生能源接入后的电网形态, 从装机容量、开机容量、超短期功率预测、电量完成率、最小弃风弃光等角度给出了多种不同的断面裕度分配方法, 并比较分析了各种方法的优缺点。提出了一种断面裕度最小弃风弃光加权分配法, 综合考虑了新能源场站的考核打分指标和电量完成指标, 并提出了相应的基于正交学习差分进化算法的求解方法。通过对新英格兰 39 节点系统仿真, 分析了该断面裕度分配方法的合理性和有效性。在确保电网安全稳定的前提下, 该方法最大程度地利用电网输送通道资源, 最大限度地提高电网对新能源发电的接纳能力, 实现了对新能源场站实时出力的动态优化分配, 保证了新能源场站出力最大化。

关键词: 断面裕度; 正交学习差分进化; 新能源; 最小弃风弃光

Section margin allocation strategy for regional landscape cluster

YAO Gang¹, XIONG Guojiang², ZHANG Jing², SHI Ke¹, WU Shihong¹

(1. Power Dispatch Control Center of Guizhou Power Grid Co., Ltd., Guiyang 550002, China;

2. School of Electrical Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China)

Abstract: In order to adapt to the grid form after a high-proportion of renewable energy is connected, this paper gives a variety of different power flow margin allocations from the perspective of installed capacity, start-up capacity, ultra-short-term power prediction, power completion rate and minimum abandoned wind and light. Also it compares and analyses their advantages and disadvantages. A power flow margin-weighted distribution method with the smallest abandonment of wind and light is proposed. This comprehensively considers the assessment and scoring indicator of new energy stations and power completion indicators, and proposes a corresponding solution based on an orthogonal learning differential evolution algorithm. The rationality and effectiveness of this power flow margin allocation method are analyzed by simulation of the New England 39-bus system. To help ensure the safety and stability of the power grid, the transmission channel resources of the power grid are used to the greatest extent, and the power grid's ability to accept new energy is maximized. This realizes the dynamic and optimal distribution of real-time output of new energy plants, and ensures the maximum output of new energy plants.

This work is supported the National Natural Science Foundation of China (No. 51867005) and the Science and Technology Foundation of Guizhou Power Grid Co., Ltd. (No. 066500KK52170037).

Key words: section margin; orthogonal learning differential evolution; new energy; minimum abandon wind and light

0 引言

“十三五”以来, 我国电力系统在能源结构调整方面取得了可喜的成绩, 以风力发电、光伏发电为代表的可再生能源发电增长迅速^[1]。可再生能源发电的快速增长, 在一定程度上减轻了电网的供电

压力, 进一步促进了环境质量的改善, 但也随之带来了调频^[2]、调峰以及消纳困难等问题。

在满足公平性、安全性、经济性等多方面约束条件下, 区域集群风光有功功率实时控制系统根据新能源发电外送通道的实时潮流、调峰约束等决定新能源总计划上限, 实时计算电网断面对于新能源有功功率的接纳能力^[3-7]。当断面处于安全状态, 且存在一定裕度时, 应当使有上调能力的新能源场站尽可能增加有功功率以充分利用断面裕度; 而当断

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51867005); 贵州电网有限责任公司科技项目(066500KK52170037)

面裕度不足,或因电网需要要求降低断面有功功率时,应当快速下调有下调空间的新能源场站有功功率,将断面有功功率控制在安全范围内^[8-9]。在“精益化”的管理思路下,为加快电网向更加智能、高效、可靠、绿色方向转变,开展市场化机制下区域风光集群断面分配策略技术研究,对电网的安全稳定运行、各种能源协同高效利用、保证调度的公平原则具有重要的意义。本文主要在市场化背景下,研究更加满足公平调度需求的一种集群新能源分配策略,并验证其合理性和有效性。

1 断面裕度分配方法介绍

从新能源场站的不同容量角度出发,可按平均分配法,根据装机容量、开机容量、超短期功率预测、受阻电量、电量完成率、最小弃风弃光原则等多种因素制定不同的断面裕度分配策略,实现对新能源场站实时有功功率的动态优化分配。

(1) 平均分配法

平均分配法即是將断面裕度平均分配给所辖区域内各新能源场站。

(2) 按装机容量等比分配法

通常情况下,不同新能源场站的装机容量不尽相同,按装机容量等比分配可以体现装机容量的重要性,保证大容量场站的发电量^[10]。按装机容量等比分配,即将同断面的断面裕度按照各新能源场站的装机容量占整个断面新能源场站总装机容量的比例进行分配。

(3) 按开机容量等比分配法

在实际运行过程中,新能源场站因不同原因造成部分风机、光伏板退出运行,从而导致新能源场站的实际开机容量小于其装机容量^[11]。此种背景下,按照开机容量等比分配可以更好地体现新能源场站的可用发电能力。根据开机容量等比分配时,即将同断面的断面裕度按照各新能源场站的实际开机容量占整个断面新能源场站总开机容量的比例进行分配。

(4) 按超短期功率预测等比分配法

现各新能源场站均安装有有功功率预测系统,具备利用数值天气预报数据、历史实测气象数据、输出功率历史数据、系统设备运行状态等快速预测未来 15 min~4 h 超短期有功功率的功能。此种背景下,按照超短期功率预测等比分配^[12-13]可以让有发电能力的新能源场站多发,以更好地利用当前的风、光资源。根据超短期功率预测等比分配时,即将同断面的断面裕度按照各新能源场站的超短期功率预

测值占整个断面新能源场站总的超短期功率预测值的比例进行分配。

(5) 按电量完成率等比分配法

因各种原因导致不同新能源场站电量完成率不同,可根据新能源场站的电量完成率情况,按照与电量完成率成反比的形式合理分配断面裕度^[14],照顾电量完成率较差的场站。

(6) 按最小弃风弃光分配法

该方法建立在风电、光伏有功功率超短期预测精度较高的基础上^[15-16],以限电量最小为目标,建立相应的数学优化模型,并采用数学优化方法实现模型的最优化求解,从而充分利用输电断面的裕度,最大化对新能源出力的接纳能力。

(7) 按最小弃风弃光加权分配法

最小弃风弃光分配法^[17-19]仅从弃风弃光角度出发,最小化新能源限电量,但并未体现公平调度原则。

对此,本文在最小弃风弃光分配法的基础上提出一种最小弃风弃光加权分配法,以权重形式体现各个新能源场站的电量完成情况和考核得分指标,充分体现公平调度原则。

2 最小弃风弃光加权分配法

2.1 最小弃风弃光加权分配法数学模型

最小弃风弃光加权分配法的主要目的是通过合理分配断面裕度,在满足相关约束条件的前提下,使限电量最少^[20]。

最小弃风弃光加权分配法的数学模型可描述为式(1)。

$$\begin{aligned} \min F(\mathbf{P}_t) &= \sum_{i=1}^N w_i F_i(P_{i,t}^{\text{com}}) \\ \text{s.t. } &\begin{cases} \mathbf{P}_t = [P_{1,t}^{\text{com}}, P_{2,t}^{\text{com}}, \dots, P_{N,t}^{\text{com}}] \in \mathbb{R}^N \\ h_k(\mathbf{P}_t) = 0, k = 1, 2, \dots, m \\ g_j(\mathbf{P}_t) \leq 0, j = 1, 2, \dots, n \end{cases} \end{aligned} \quad (1)$$

式中: t 为当前时刻; $F(\mathbf{P}_t)$ 为总弃风弃光限电量; N 为被断面约束新能源场站可调数; $P_{i,t}^{\text{com}}$ 为第 i 个新能源场站的有功指令; $F_i(P_{i,t}^{\text{com}})$ 为第 i 个新能源场站被限电量; w_i 为第 i 个新能源场站被限电量权重系数; m 和 n 分别为等式约束条件和不等式约束条件数; $h_k(\mathbf{P}_t)$ 为第 k 个等式约束条件; $g_j(\mathbf{P}_t)$ 为第 j 个不等式约束条件。

第 i 个新能源场站被限电量 $F_i(\mathbf{P}_t)$ 定义为

$$F_i(\mathbf{P}_{i,t}^{\text{com}}) = |P_{i,t}^{\text{com}} - P_{i,t}^{\text{pre}}| \quad (2)$$

式中, $P_{i,t}^{\text{pre}}$ 为第 i 个新能源场站的有功功率预测值。其物理含义为第 i 个新能源场站有功功率指令与该

场站当前可发最大有功功率之差, 差值越小, 说明限电量越小, 反之, 该场站有功功率受限越大, 弃风弃光越严重。

结合式(1)和式(2)可知, 某个新能源场站的权重系数 w_i 越大, 则该场站对目标函数的贡献越大, 为使区域电网新能源被限电量达到最少, 则该场站被限电量理应更少。因此, 权重系数 w_i 体现了新能源场站在断面裕度分配过程中的重要性。

式(1)中的约束条件包括以下 3 种。

(1) 新能源场站有功功率调节范围约束

$$\delta P_{i,t}^o \leq P_{i,t}^{\text{com}} \leq P_{i,t}^{\text{pre}} \quad (3)$$

式中: $P_{i,t}^o$ 为第 i 个新能源场站的运行(开机)容量; δ 为第 i 个新能源场站的最低负荷率保护系数, 取 0.2。

(2) 新能源场站有功功率调节速率约束

$$-s_i \Delta t \leq P_{i,t}^{\text{com}} - P_{i,t}^{\text{now}} \leq s_i \Delta t \quad (4)$$

式中: $P_{i,t}^{\text{now}}$ 为第 i 个新能源场站的实时有功功率; s_i 为第 i 个新能源场站单位时间最大调节量; Δt 为调节时间。式(4)等价于

$$P_{i,t}^{\text{now}} - s_i \Delta t \leq P_{i,t}^{\text{com}} \leq P_{i,t}^{\text{now}} + s_i \Delta t \quad (5)$$

由式(4)和式(5)可知, 新能源场站有功功率实际调节范围为

$$\max\{\delta P_{i,t}^o, P_{i,t}^{\text{now}} - s_i \Delta t\} \leq P_{i,t}^{\text{com}} \leq \min\{P_{i,t}^{\text{pre}}, P_{i,t}^{\text{now}} + s_i \Delta t\}$$

(3) 断面可接纳空间约束

$$\mathring{\mathbf{a}} \sum_{i=1}^N S_i (P_{i,t}^{\text{com}} - P_{i,t}^{\text{now}}) \leq VP_{\text{JNK},t} \quad (6)$$

式中: S_i 为第 i 个新能源场站对断面的灵敏度; $VP_{\text{JNK},t}$ 为断面可接纳空间。

2.2 被限电量加权系数计算方法

第 i 个新能源场站被限电量权重系数 w_i 与该新能源场站的电量完成情况和考核打分指标有关, 定义为

$$w_i = \lambda_i / \gamma_i \quad (7)$$

式中, λ_i 和 γ_i 分别为第 i 个新能源场站的考核打分指标和电量完成指标。

第 i 个新能源场站考核打分指标 λ_i 的计算方法为

$$\lambda_i = \mu_1 \chi_{i,\text{agc}}^{\text{ope}} + \mu_2 \chi_{i,\text{agc}}^{\text{res}} + \mu_3 \chi_{i,\text{agc}}^{\text{acc}} + \mu_4 \chi_{i,\text{pre}}^{\text{day_acc}} + \mu_5 \chi_{i,\text{pre}}^{\text{sht_acc}} + \mu_6 \chi_{i,\text{data}}^{\text{qua}} \quad (8)$$

式中: $\chi_{i,\text{agc}}^{\text{ope}}$ 、 $\chi_{i,\text{agc}}^{\text{res}}$ 和 $\chi_{i,\text{agc}}^{\text{acc}}$ 分别为 AGC 的投运率、响应率和跟踪准确率; $\chi_{i,\text{pre}}^{\text{day_acc}}$ 和 $\chi_{i,\text{pre}}^{\text{sht_acc}}$ 分别为日前有功功率预测准确率和日内超短期有功功率预测准确率; $\chi_{i,\text{data}}^{\text{qua}}$ 为数据采集合格率。上述 6 个指标取值可以季度、月度或周为周期进行滚动调整。系数

$\mu = [\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_6]$ 为各个指标的权重, 满足式(9)所示要求, 各个系数的取值可视具体要求进行设置, 本文后续仿真均取相同值, 即 $\mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \mu_4 = \mu_5 = \mu_6 = 1/6$ 。

$$\mu_1 + \mu_2 + \mu_3 + \mu_4 + \mu_5 + \mu_6 = 1 \quad (9)$$

式(8)表明, 某新能源场站的考核打分指标越高, 说明该场站的综合性能越好, 理应获得越大的被限电量权重系数; 电量完成指标越差, 表明该场站因某些原因导致本月电量未能及时跟上进度, 在后期调节过程中应该得到一定程度的照顾。值得说明的是, 根据运行经验, 某新能源场站本月电量未完成之前, 不对其进行考核打分, 即其考核打分指标设为 1, 表示综合性能最好; 待本月电量完成后, 再按式(9)所示实际考核打分指标计算其被限电量权重系数。

3 差分进化算法求解

由上节可知, 最小弃风弃光加权分配法的数学模型是一个典型多约束最小化优化问题, 针对边界约束, 本文采用差分进化算法确保每个个体优先满足边界约束。针对断面可接纳空间约束条件, 采用罚函数法将不等式约束优化问题转化为无约束优化问题, 从而简化数学模型的求解复杂度。

转化步骤如下述。

(1) 计算每个个体违反断面可接纳空间约束的量值大小

$$\text{delta} = \sum_{i=1}^N S_i (P_{i,t}^{\text{com}} - P_{i,t}^{\text{now}}) - \Delta P_{\text{JNK},t} \quad (10)$$

(2) 计算实际惩罚值

$$\text{violation} = \max\{0, \text{delta}\} \quad (11)$$

(3) 构造新的目标函数

$$\min E'(\mathbf{P}_t) = \sum_{i=1}^N w_i (P_{i,t}^{\text{com}} - P_{i,t}^{\text{pre}})^2 + \zeta \cdot \text{violation} \quad (12)$$

式(12)中, ζ 为取值较大的惩罚系数, 如 10 000。

由式(12)可知, 若某个个体违反不等式约束的量值越大, 其目标函数值 $E'(\mathbf{P}_t)$ 数值越大, 在采用正交学习差分进化算法(Orthogonal Learning Differential Evolution, OLDE)计算过程中越容易被淘汰掉, 当个体不违反约束条件, 则式(12)将等价于原目标函数。

4 算例仿真分析

本文构造的新英格兰 39 节点仿真系统如图 1 所示, 设置了新能源集群送出断面, 断面稳定运行阈值 450 MW。该区域电网包含 4 个风电场和 2 个光伏电站, 相关运行参数和指标参数如表 1 和表

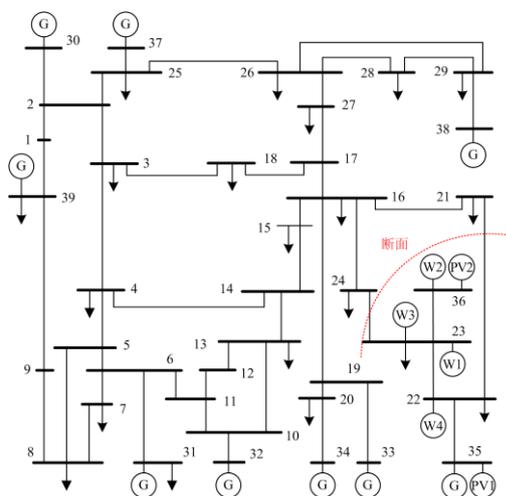


图1 新英格兰39节点系统

Fig. 1 New-England 39 bus power system

2 所示。根据风电场有功功率变化限值的推荐值,按照小于 30 MW 的新能源场站可实现 3 MW/min、

30~150 MW 的可实现 10 MW/min、大于 150 MW 的可实现 15 MW/min 的速率变化进行仿真设置。

4.1 增出力情形

假设某时刻断面实际潮流值为 402 MW, 此时各新能源场站的实时有功功率值和最大出力预估值如表 3 所示, 表中也给出了此时各个场站的电量完成情况。由表 2 和表 3 数据可算出各个新能源场站的被限电量权重系数, 如表 4 所示。

由于此时断面存在裕度 $VP_{JNK,t} = 48 \text{ MW}$, 且各个新能源场站出力预估值大于实时出力值, AGC 功能将动作于增调各个场站有功功率。调整过程如表 5 所示。

(1) 当前时刻至第 1 周期: 此时断面裕度较大, 且新能源场站 W1、W2、W4 和 PV2 当前出力预估空间富余, 这四个场站按照最大调整限值增调出力, 调整限值仅受有功功率调节速率约束; 对于 W3 和 PV1, 当前出力预估空间较小, 其调整幅值按照最大出力预估空间调整。

表 1 各新能源场站运行参数

Table 1 Operation parameters of each new energy station

新能源场站	装机容量/MW	运行容量/MW	调节速率限值/(MW/min)	断面灵敏度
W1	99	92	9.9	0.604 3
W2	245	214	15	0.526 1
W3	49.5	45	4.95	0.549 1
W4	100.5	80	10.05	0.551 6
PV1	50	42	5	0.574 2
PV2	65	54	6.5	0.651 8

表 2 各新能源场站指标参数

Table 2 Index parameters of each new energy station

场站	AGC 投运率	AGC 响应率	AGC 跟踪准确率	日前预测准确率	超短期预测准确率	数据采集合格率	考核打分指标
W1	0.52	0.77	0.91	0.73	0.92	0.66	0.75
W2	0.72	0.82	0.72	0.76	0.88	0.73	0.77
W3	0.39	0.75	0.84	0.68	0.91	0.69	0.71
W4	0.48	0.85	0.69	0.69	0.87	0.58	0.69
PV1	0.61	0.61	0.77	0.78	0.90	0.49	0.69
PV2	0.55	0.68	0.87	0.69	0.92	0.62	0.72

表 3 增出力情形下各新能源场站实时运行情况

Table 3 Real-time operation of each new energy stations under the output increase

新能源场站	$P_{\text{实时}}/\text{MW}$	$P_{\text{max}}_{\text{预估}}/\text{MW}$	电量完成率
W1	56.67	75.81	0.85
W2	127.42	168.62	0.71
W3	37.98	41.55	1.12
W4	54.51	70.42	0.93
PV1	34.07	37.91	1.35
PV2	37.33	48.34	0.82

表 4 增出力情形下各新能源场站被限电量权重系数

Table 4 Weight coefficient of the limited power for each new energy stations under the output increase

新能源场站	被限电量权重系数
W1	1.18
W2	1.41
W3	0.63
W4	1.08
PV1	0.51
PV2	1.22

表 5 增出力情形下各新能源场站有功功率调整过程

Table 5 Active power adjustment process of the each new energy stations under the output increase

新能源场站	当前出力	第 1 调节周期指令值	调节量	第 2 调节周期指令值	调节量	第 3 调节周期指令值	调节量	最终受限
W1	56.67	66.57	9.90	75.81	9.24	75.81	0.00	0
W2	127.42	142.42	15.00	157.42	15.00	168.62	11.20	0
W3	37.98	41.55	3.57	41.55	0	37.02	-4.53	4.53
W4	54.51	64.56	10.05	70.42	5.86	70.42	0.00	0
PV1	34.07	37.91	3.84	37.91	0	32.91	-5.00	5.00
PV2	37.33	43.83	6.50	48.34	4.51	48.34	0	0
断面裕度	48	20.92	-27.08	1.27	-19.65	0	-1.27	—

(2) 第 1 周期至第 2 周期: 此时断面裕度仍然较大, 且新能源场站 W2 当前出力预估空间仍然富余, 该场站按照最大调整限值增调出力, 调整限值仅受有功功率调节速率约束; 对于 W1、W4 和 PV2, 这三个场站出力预估空间已经小于有功功率调节速率限制的最大调节范围, 因此只能按照出力预估空间调整至当前风光条件下可能的最大出力值; 对于 W3 和 PV1, 因为上一轮已调整至当前风光条件下可能的最大出力值, 因此本轮不做调整。

(3) 第 2 周期至第 3 周期: 此时断面裕度仅剩 1.27 MW, 但新能源场站 W2 仍有较大调整空间, 其出力将继续调整, 最终增调至当前风力条件下可能的最大出力值; 另外, 在当前断面裕度有限的情况下, 为了使弃风弃光加权最小, 在前两轮中已调整至当前风光条件下最大出力值的部分新能源场站 (W3 和 PV1) 将继续进行出力调整。由表 4 可知, W2 的被限电量权重系数最大, 表明该场站最终被限电量应该最少; 而 PV1 的被限电量权重系数最小, 表明该场站最终被限电量应该最多, 表 5 的最终计算结果也充分体现了上述结论。结合表 4 和表 5 可知, 被限电量权重系数大于 1 的新能源场站 (W1、W2、W4 和 PV2) 最终均没有被限, 而被限电量权重系数小于 1 的新能源场站 (W3 和 PV1) 均有不同程度的被限。

(4) 整个调整过程体现了先最大化利用断面裕度, 后合理性调整场站出力的分配思路, 即先以最快速度接纳新能源, 而后再在断面裕度被充分利用的基础上合理调整各个场站之间的有功功率, 最终使区域电网被限电量总量加权最少, 这种断面裕度分配思路是符合电网实际调度逻辑的。

4.2 降出力情形

假设某时刻断面实际潮流值为 480 MW, 各新能源场站的实时有功功率值、最大出力预估值以及电量完成率如表 6 所示。由表 2 和表 6 数据可算出各个新能源场站的被限电量权重系数, 如表 7 所示。

表 6 降出力情形下各新能源场站实时运行情况

Table 6 Real-time operation of each new energy stations under the output drop

新能源场站	$P_{\text{实时}}/\text{MW}$	P_{max} 预估/MW	电量完成率
W1	82.38	90.4	1.2
W2	187.64	200.91	1.1
W3	42.36	39	0.95
W4	72.89	67	1.28
PV1	40.37	40	0.84
PV2	49.81	45	0.92

表 7 降出力情形下各新能源场站被限电量权重系数

Table 7 Weight coefficient of the limited power for each new energy stations under the output drop

新能源场站	被限电量权重系数
W1	0.63
W2	0.70
W3	1.05
W4	0.54
PV1	1.19
PV2	1.09

由于此时断面裕度 $VP_{\text{JNK},t}$ 为 -30 MW, AGC 功能将动作于调减各个新能源场站的有功功率。调整过程如表 8 所示。

(1) 当前时刻至第 1 调节周期, 此时断面过载严重, 而各个新能源场站的下调空间充足, 各个场站将以最快速度调减出力, 调整限值仅受有功功率调节速率约束。

(2) 第 1 调节周期至第 2 调节周期: 此时断面过载量较小 (1.75 MW), 并不是所有新能源场站继续调减出力, 而是出现增减调节并存的情形, 表明此时各个场站通过调整出力, 在满足断面约束的前提下, 使区域电网被限电量总量加权最少; 结合表 7 和表 8 可知, 被限电量权重系数大于 1 的新能源场站 (W3、PV1 和 PV2) 最终均没有被限, 而被限电量权重系数小于 1 的新能源场站 (W1、W2 和 W4) 均有不同程度的被限。

(3) 整个调整过程体现了先最大化消除断面过载,后合理性调整场站出力的分配思路,即先以最快速度将断面潮流控制在允许范围内,确保电网安全稳定运行,而后再在此基础上合理调整各个场站之间的有功功率,最终使区域电网被限电量总量加

权最少,这种断面裕度分配思路同样是符合电网实际调度过程的。

4.3 各种断面裕度分配方法对比

分析第1节的各种断面裕度分配方法的结果,如表9和表10所示。

表8 降出力情形下各新能源场站有功功率调整过程

Table 8 Active power adjustment process of the each new energy stations under the output drop

							MW
新能源场站	当前出力	第1调节周期指令值	调节量	第2调节周期指令值	调节量	最终受限	
W1	82.38	72.48	-9.90	62.58	-9.90	-27.82	
W2	187.64	172.64	-15.00	184.30	11.66	-16.61	
W3	42.36	37.41	-4.95	39.00	1.59	0	
W4	72.89	62.84	-10.05	52.79	-10.05	-14.21	
PV1	40.37	35.37	-5.00	40.00	4.63	0	
PV2	49.81	43.31	-6.50	45.00	1.69	0	
断面裕度	-30	-1.75	-28.25	0	-1.75	-	

表9 增出力情形下各种断面裕度分配方法被限电量结果

Table 9 Limited power result of the different section margin allocation under the output increase

								MW
新能源场站	平均分配法	按装机容量等比分配法	按开机容量等比分配法	按超短期功率预测等比分配法	按电量完成率等比分配法	按最小弃风弃光分配法	按最小弃风弃光加权分配法	
W1	0	3.99	2.85	2.92	0	1.86	0	
W2	10.19	3.72	3.30	5.12	10.19	0	0	
W3	0	0	0	0	0	0	4.53	
W4	0	0.53	1.74	0.84	0	0	0	
PV1	0	0	0	0	0	0	5	
PV2	0	1.07	1.45	0.67	0	6.5	0	
被限总量	10.19	9.31	9.33	9.55	10.19	8.36	9.53	

表10 降出力情形下各种断面裕度分配方法被限电量结果

Table 10 Limited power result of the different section margin allocation under the output drop

								MW
新能源场站	平均分配法	按装机容量等比分配法	按开机容量等比分配法	按超短期功率预测等比分配法	按电量完成率等比分配法	按最小弃风弃光分配法	按最小弃风弃光加权分配法	
W1	16.70	16.69	17.33	18.03	17.42	27.82	27.82	
W2	21.95	34.74	34.93	35.51	24.52	13.27	16.61	
W3	5.32	0.98	1.20	0.96	3.77	0	0	
W4	2.79	2.92	2.21	1.53	2.70	0	14.21	
PV1	8.31	4.01	3.88	4.06	5.55	7.41	0	
PV2	3.87	0.88	0.66	0.17	4.93	8.19	0	
被限总量	58.93	60.22	60.21	60.25	58.89	56.69	58.64	

(1) 增出力情形:由表9可知,平均分配法和按电量完成率等比分配法的被限电量总量最多,按最小弃风弃光分配法的被限电量总量最少。

从受限新能源场站看,本文提出的按最小弃风弃光加权分配法仅限制W3和PV1,这是因为这两个场站的被限电量权重系数小于其他四个场站。事实上,抛开考核打分指标,仅从电量完成率角度来看,W3和PV1已经超额完成本月电量目标,从公

平调度原则出发,断面受限时理应优先限制这两个场站,而其他六种断面裕度分配方法都没有限制这两个场站,从而没有体现公平调度原则。由此可知,本文提出的断面裕度分配方法虽然不能使被限电量总量最少,但分配结果充分体现了公平调度原则,这一点是其他方法无法相比的,这也是本文的研究目标。

(2) 降出力情形:由表10可知,按超短期功率

预测等比分配法的被限电量总量最多，而被限电量总量最少的仍然是按最小弃风弃光分配法。从受限新能源场站看，本文提出的按最小弃风弃光加权分配法仅限制 W1、W2 和 W4，是因为这三个场站的被限电量权重系数小于其他四个场站。同样地，仅从电量完成率角度来看，W1、W2 和 W4 已经超额完成本月电量目标，从公平调度原则出发，断面受限时应优先限制这三个场站，但前五种断面裕度分配方法同时限制所有场站，虽然按最小弃风弃光分配法限制了 W1 和 W2，但没有限制 W4，而 W4 的电量完成率恰恰是最大的，此外，该方法限制了 PV1 和 PV2，但这两个场站还没有完成本月总电量目标。从上述分析可知，除了本文提出的按最小弃

风弃光加权分配法外，其余六种断面裕度分配方法均没有体现公平调度原则，甚至有可能进一步加剧各个新能源场站之间的不公性。

5 总结

本文从装机容量、开机容量、超短期功率预测、电量完成率、最小弃风弃光等角度给出了多种不同的断面裕度分配方法，并比较分析了各种方法的优缺点。比较结果表明，最小弃风弃光加权分配法综合考虑了弃风弃光量、电量完成率、新能源场站运行状态等因素，充分体现了公平调度原则。

由此可以得出不同断面裕度分配方法从不同角度出发，各种方法的优缺点对比如表 11 所示。

表 11 断面裕度分配方法对比结果

Table 11 Method comparison result of the section margin allocation

断面裕度分配方法	优点	缺点
平均分配法	简单、易于实现	不能体现公平调度原则
按装机容量等比分配法	体现大场站优先权	不能体现检修机组影响
按开机容量等比分配法	考虑检修机组影响	不能体现资源分布
按超短期功率预测等比分配法	考虑资源分布	不能体现电量完成情况
按电量完成率等比分配法	考虑电量完成情况	不能体现弃风弃光
按最小弃风弃光分配法	考虑弃风弃光	不能体现电量完成情况
按最小弃风弃光加权分配法	考虑弃风弃光、电量完成情况、运行性能等，充分体现公平调度	实际新能源受限量未必最小

以最快速度接纳新能源，而后再在断面裕度被充分利用的基础上合理调整各个场站之间的有功功率，最终使区域电网被限电量总量加权最少，这种断面裕度分配思路是符合电网实际调度运行的。

断面裕度最小弃风弃光加权分配法可以充分利用断面裕度，根据各个新能源场站的电量完成情况和考核打分指标合理分配各个新能源场站的有功功率，在增降出力的情形下，充分体现了公平调度原则。

电网公司针对风电、光伏集群并网运行分配策略应进一步深入研究并实际应用，以适应新能源并网渗透率的不断提高。

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 Qiang, WANG Ningbo, HE Shi'en, 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] PATHAK N, BHATTI T S, VERMA A. New performance indices for the optimization of controller gains of automatic generation control of an interconnected thermal power system[J]. Sustainable Energy, Grids and Networks, 2017: 927-937.
- [3] 王昊昊, 徐泰山, 马彦宏, 等. 计及多类型电源协调的有功控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(4): 168-175.
WANG Haohao, XU Taishan, MA Yanhong, et al. A novel active power control strategy considering multi-resource coordination[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(4): 168-175.
- [4] 姚良忠, 朱凌志, 周明, 等. 高比例可再生能源电力系统的协同优化运行技术展望[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(9): 36-43.
YAO Liangzhong, ZHU Lingzhi, ZHOU Ming, et al. Prospects of coordination and optimization for power systems with high proportion of renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(9): 36-43.
- [5] 张鹏, 黄越辉, 李驰, 等. 基于公平调度的新能源调度方法[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(20): 252-259.
ZHANG Peng, HUANG Yuehui, LI Chi, et al. New energy dispatching method based on fair power dispatching[J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(20): 252-259.
- [6] 胡泽春, 罗浩成. 大规模可再生能源接入背景下自动发电控制研究现状与展望[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(8): 2-15.
HU Zechun, LUO Haocheng. Research status and prospect of automatic generation control with integration of large-scale renewable energy[J]. Automation of

- Electric Power Systems, 2018, 42(8): 2-15.
- [7] LI Han, ESEYE A T, ZHANG Jianhua, et al. Optimal energy management for industrial microgrids with high-penetration renewable[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 122-135. DOI: 10.1186/s41601-017-0040-6.
- [8] 杨蕾, 李胜男, 黄伟. 等. 考虑风光新能源参与二次调频的多源最优协同控制[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(19): 43-49.
YANG Lei, LI Shengnan, HUANG Wei, et al. Optimal coordinated control of multi-source for AGC with participation of wind and solar energy[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(19): 43-49.
- [9] 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 Junfeng, JIN Xuezu, DENG Bo, 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.
- [10] 张晋芳, 栗楠, 刘俊, 等. 一种基于调峰平衡的风光综合消纳分析方法[J]. 中国电力, 2019, 52(3): 68-72.
ZHANG Jinfang, LI Nan, LIU Jun, et al. An integrated analysis method for wind & solar power accommodation based on peak regulation balance principle[J]. Electric Power, 2019, 52(3): 68-72.
- [11] 林俐, 朱晨宸, 郑太一, 等. 风电集群有功功率控制及其策略[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(14): 9-16.
LIN Li, ZHU Chenchen, ZHENG Taiyi, et al. Active power control of wind farm cluster and its strategy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(14): 9-16.
- [12] 仲悟之, 李梓锋, 肖洋, 等. 高渗透联网风电集群有功分层递阶控制策略[J]. 电网技术, 2018, 42(6): 1868-1875.
ZHONG Wuzhi, LI Zifeng, XIAO Yang, et al. Active hierarchical progressive control strategy of highly penetrated networked wind power cluster[J]. Power System Technology, 2018, 42(6): 1868-1875.
- [13] 汤奕, 王琦, 陈宁, 等. 考虑预测误差分布特性的风电场集群调度方法[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(25): 27-32, 7.
TANG Yi, WANG Qi, CHEN Ning, et al. A dispatching method of active power in wind farm clusters considering probability distribution of forecasting errors[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(25): 27-32, 7.
- [14] 王靖然, 王玉林, 杨志刚, 等. 考虑嵌套断面约束的大规模集群风电有功控制策略[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(13): 16-21.
WANG Jingran, WANG Yulin, YANG Zhigang, et al. An active power control strategy for large-scale cluster of wind power considering constraints on nested transmission sections[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(13): 16-21.
- [15] 翟丙旭, 王靖然, 杨志刚, 等. 调峰约束下考虑发电优先级的风电有功控制策略[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(23): 83-88.
ZHAI Bingxu, WANG Jingran, YANG Zhigang, et al. Active power control strategy for wind power considering priorities of power generation with peak regulation constraints[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(23): 83-88.
- [16] 王世谦, 林俐, 狄立, 等. 限出力条件下风电场集群有功功率优化分配方法[J]. 中国电力, 2013, 46(12): 107-112.
WANG Shiqian, LIN Li, DI Li, et al. Method for wind farm cluster active power optimal dispatch under restricted output condition[J]. Electric Power, 2013, 46(12): 107-112.
- [17] 叶希, 鲁宗相, 乔颖, 等. 风火联运源端系统有功优化运行分层协调思路[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(20): 1-8.
YE Xi, LU Zongxiang, QIAO Ying, et al. Hierarchical coordinated idea of wind and thermal power bundled transmission system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(20): 1-8.
- [18] 王宗杰, 郭志忠, 王贵忠, 等. 高比例可再生能源电网功率平衡的实时调度临界时间尺度研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(增刊 1): 39-46.
WANG Zongjie, GUO Zhizhong, WANG Guizhong, et al. On the critical timescale of real-time dispatch considering power balancing under power systems with high proportional intermittent power sources[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(S1): 39-46.
- [19] 王彬, 孙勇, 吴文传, 等. 应用于高风电渗透率电网的风电调度实时控制方法与实现[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(21): 23-29.
WANG Bin, SUN Yong, WU Wenchuan, et al. A real-time wind power control method for power systems with high wind power penetration and its implementation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(21): 23-29.
- [20] 武晓冬, 朱燕芳, 田慕琴. 风电场层 AGC 常用分配策略的对比研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(16): 173-179.
WU Xiaodong, ZHU Yanfang, TIAN Muqin. Comparative study of the popular distribution strategies for the wind farm layer AGC[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(16): 173-179.

收稿日期: 2020-11-24; 修回日期: 2021-05-04

作者简介:

姚刚(1987—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统调度运行与控制、新能源消纳与规划。E-mail: 395139559@qq.com

(编辑 魏小丽)