

# 风电场功率分配算法

刘伟<sup>1</sup>, 黄越辉<sup>1</sup>, 刘纯<sup>1</sup>, 范国英<sup>2</sup>, 杨国新<sup>2</sup>

(1. 中国电力科学研究院, 北京 100192; 2. 吉林省电力公司, 吉林 长春 130021)

**摘 要:** 在风电出力受限时, 调度需要考虑多个风电场出力叠加所带来的平滑效应, 优化功率分配。根据风电场是否具备风电功率预测系统建立了 5 种不同的风电场功率分配算法模型, 以单个区域中的多个风电场的未来 1 h 功率预测数据来计算 5 种算法下所有风电场的总出力及相应的损失电量。结果表明, 考虑预测的算法所得到的风电场出力情况与风力发电限值最为接近, 且损失电量最少, 明显优于不考虑预测条件下的算法。通过研究这 5 种算法也为风力发电的调度提供优化方案。

**关键词:** 风力发电; 功率分配; 出力限制

中图分类号: TM614

文献标志码: A

文章编号: 1004-9649(2011)08-0053-04

## 0 引言

截至 2010 年底, 我国的风电累计装机容量达到 44.7 GW; 预计到 2020 年, 累计装机将达到 150 GW<sup>[1]</sup>。由于风电出力的间歇性及波动性, 大规模风电并网所带来的运行问题也更为突出; 并且由于电网实时运行, 对风力发电的接纳能力受到诸多安全经济因素的制约, 其中电网能提供的调峰容量与风电输送能力不足是目前主要的影响因素。当负荷和风电波动超过电力系统调峰极限时, 电网将难以平衡风电出力, 在所有其他电源调节到最低出力情况下, 需要对风力发电输出功率进行限制<sup>[2-3]</sup>。受系统调峰资源约束, 吉林电网和蒙东电网在 2008 年发生了多次限风电出力运行情况<sup>[4]</sup>。当风电受限时电网调度在综合考虑了多个风电场总出力具有互补和平滑效应后, 往往要限制多个风电场总出力。而风电场之间对风电功率限值分配的合理性也深刻影响着风能的利用率。

## 1 风力发电调度

在包含风力发电的系统运行中, 如果风力发电的并网容量很小, 对于当地电网的影响基本可以忽略, 风电常常当作负的随机负荷, 可全部消纳。当风电出力占系统最大负荷比例超过一定比例时, 风电出力的波动性和随机性对系统调峰的影响将不能忽略, 风电需要纳入调度计划。调度在统筹全网运行情况的基础上, 确定当天系统所能平衡的风电容量, 得

到风电功率限值, 各风电场的发电计划是通过分配风电功率限值来得到的。分配算法可根据实际运行情况进行精细化和粗略化地分配, 在分配不优化的情况下将导致风电实际出力与总限值要求差别较大, 损失大量风电电量, 不利于清洁能源的利用。

## 2 风电场功率分配算法的数学描述

将风电总出力的限值分配到各风电场的功率分配算法有很多, 本文根据在实际调度运行中是否具备风电功率预测, 提出 5 种功率分配算法: (1) 无风电功率预测的平均分配法; (2) 无风电功率预测的装机容量分配法; (3) 基于风电功率预测的预测出力比例分配法; (4) 基于风电功率预测的最优分配法; (5) 基于风电功率预测的计划排队法。其详细的数学模型在下面小节中描述。

### 2.1 无风电功率预测的平均分配法

当风电场不具备风电功率预测能力时, 考虑到公平分配, 可将风电功率限值平均分配到各风电场。当某风电场的分配值小于其调节下限时, 则该风电场的分配值应为其调节下限; 当分配值大于其装机容量时, 则该风场的分配值应为其装机容量。其数学模型如下:

$$\begin{aligned} P_i(t) &= P_{lim}(t)/N \\ \text{s.t. } &\begin{cases} \sum_{i=1}^n P_i(t) \leq P_{lim}(t) \\ P_i(t) \geq P_{max}(t) \text{ 时, } P_i(t) = P_{max}(t) \\ P_i(t) \leq P_{min}(t) \text{ 时, } P_i(t) = P_{min}(t) \end{cases} \end{aligned} \quad (1)$$

收稿日期: 2011-04-18

基金项目: 国家电网公司科技资助项目(NWG-DD-KJ[2010]743)

作者简介: 刘伟(1983—), 男, 山西朔州人, 硕士研究生, 从事新能源调度方面的研究工作。E-mail: lwgold@163.com

式中:  $P_i(t)$  为第  $i$  个风电场的功率分配值;  $P_{\text{Lim}}(t)$  为风电总功率限值;  $P_{\text{min}}(t)$  为风电场调节下限;  $P_{\text{max}}(t)$  为风电场装机容量;  $N$  为风电场的个数。

## 2.2 无风电功率预测的装机容量分配法

一般各风电场装机容量不相同, 其最大出力为其装机容量。在进行功率分配时, 若不考虑其装机容量, 平均分配显得不公平。无风电功率预测的装机容量分配法指在不考虑预测的情况下, 将风力发电功率限值按风场装机容量比例分配到各风电场, 条件约束与平均分配相同。其数学模型如下:

$$P_i(t) = P_{\text{Lim}}(t) \frac{P_{\text{max}i}(t)}{\sum_{i=1}^n P_{\text{max}i}(t)} \quad (2)$$

式中:  $P_{\text{max}}(t)$  为第  $i$  个风电场的装机容量。

## 2.3 基于风电功率预测的预测出力比例分配法

通过风电功率预测技术可以提前掌握风力发电的变化趋势, 优化风电调度。按照风电场功率的预测值比例分配, 可以更合理地分配功率限值。其根据一个时段内各风电场出力预测的平均值比例分配风电功率限值。当某风场的分配值小于其调节下限时, 分配值为零; 当大于其装机容量时, 则为其装机容量。其数学模型如下:

$$P_i(t) = P_{\text{Lim}}(t) \frac{P_{\text{predict}i}(t)}{\sum_{i=1}^n P_{\text{predict}i}(t)} \quad (3)$$

式中:  $P_{\text{predict}i}(t)$  为第  $i$  个风电场的预测出力。

## 2.4 基于风电功率预测的最优分配法

在考虑预测的情况下, 以最小限电量为目标, 采用数学规划方法可以实现各风电场功率限值的最优分配。该方法一方面要考虑参与优化的风电场个数; 另一方面要考虑优化时段内的时段数。由于风电场功率控制系统一般不能在 0~100% 范围内连续调节, 当预测值小于风场调节下限时, 该风电场不应参与功率分配, 而其他预期出力大的风电场参与优化分配算法。该方法数学模型如下所示:

$$\begin{aligned} \min f = & \sum_{i=1}^n M_i[P_i(t)] \\ \text{s.t.} \quad & \begin{cases} \sum_{i=1}^n P_i(t) \leq P_{\text{Lim}}(t) \\ P_i(t) \leq P_{\text{predict}i}(t) \end{cases} \end{aligned} \quad (4)$$

式中:  $M_i[P_i(t)]$  为第  $i$  个风场的预期限电量;  $P_i(t)$  为第  $i$  个风场的功率分配值。

## 2.5 基于风电功率预测的计划排队法

在不完全市场竞争的情况下, 受各风电场风况和技术水平限制, 风电出力限值约束不变时, 某些风场可能出现长期功率限值偏低、电量损失较多、经济损失比较大的结果, 不利于各风电场之间的横向比

较和技术竞争。本文提出一种计划排序分配法。在该方法中, 首先根据风电场累积限电量、技术水平及考核情况等综合指标排序, 再根据排序结果优先分配容量。当风电场在一段时间内所有的预测值都小于其调节下限时, 则认为该风电场不参与功率分配; 当风电场预测值大于其调节下限时, 要对这些风电场进行轮流功率分配。该方法的数学模型如下:

$$P(t)_i = P_{\text{predict}i}(t) - N_{\text{um}} P_n(t) \quad (5)$$

式中:  $P_n(t)$  为每次分配的容量;  $N_{\text{um}}$  为在功率分配时计算的次数。

# 3 算例分析

## 3.1 算例描述

现以某地区 2009 年某日电网的实际运行数据为例进行分析。在负荷低谷时段, 由于风电出力较大, 所有机组调节到最小下限时仍不能满足系统需求, 需要限制部分风电出力才能保证系统有功平衡。该天电网对于风力发电的最大接纳能力曲线与该地区所有风电场的预测出力总和曲线如图 1 所示。

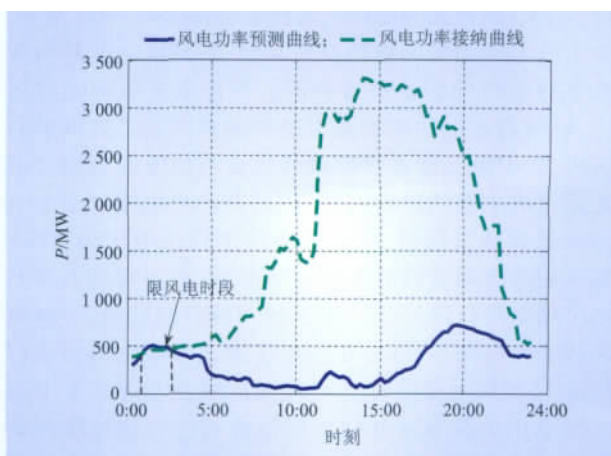


图 1 某日最大风电接纳能力曲线  
Fig. 1 Admissible wind power in one day

图 1 中, 凌晨 01:00—02:00, 风力发电的预测出力超过了电网最大风力发电的接纳值, 为保证系统的安全稳定运行, 需要对风电总出力进行限制。在该时间段内, 风力发电的最大接纳值即为风力发电功率限值。本文对该地区的 6 个风电场进行功率分配, 得到这些风电场在该时段内的计划出力值。

风电场出力限制是通过启停风电机组或者调整桨矩角来实现的, 由于风电机组为机械设备, 频繁地启停风电机组或者调整桨距角对风电机组寿命影响非常大, 不仅增加了风电机组的磨损及运行费用, 而且受技术水平限制, 风电场的调节响应速率也有一定的限制, 风电场限值指令频繁变化可能会出现风电场实际执行不能满足要求的情况。同时, 功率预测

系统提供的预测是 15 min 为一个测点,短时间尺度风电出力变化非常小,据统计,单个风电场 15 min 内变化基本小于装机容量的 8%。本文通过调研各风电场实际可执行情况,在出现风电总功率限值时,各风场限值指令 1 h 内保持不变。当风电场技术水平提高后,缩短该指令变化周期将使得各风电场限值指令更有效。

表 1 为该算例风电场 01:15—02:00 时间段内的预测出力值及装机容量情况。该时段内,受系统调峰影响,风力发电最大接纳能力为 460 MW,且各风电场调节下限为该风电场装机容量的 30%。

表 1 6 个风电场的预测出力及安装容量

Tab. 1 Installed capacity and power output prediction of 6 wind farms

风电场	装机容量	调节下限	风电场 4 个时刻的预测出力值			
			01:15	01:30	01:45	02:00
1	80.00	24.00	20.70	21.17	27.68	27.46
2	30.00	9.00	26.90	26.90	26.90	26.90
3	245.00	73.50	90.82	104.31	118.97	127.42
4	100.00	30.00	36.73	37.33	37.03	40.30
5	49.00	14.70	18.57	20.90	19.57	16.87
6	450.00	135.00	318.27	287.61	288.79	271.04
总和	954.00	286.21	511.99	498.22	518.94	509.99

### 3.2 5 种算法结果比较

采用上述的 5 种算法模型,可以得到每个风电场在该时段的功率分配值。由于各限值指令有可能大于预测值,也有可能小于预测值,所以各风电场实际出力为功率分配值与预测值中的小者。算例中 6 个风场出力限制后的风电实际总出力如表 2 所示。

表 2 采用 5 种算法功率分配限制后风电总出力

Tab. 2 Wind power outputs after wind curtailment

项目	风电出力			
	01:15	01:30	01:45	02:00
预测总出力	511.99	498.22	518.94	509.99
风力发电功率限值	460.00	460.00	460.00	460.00
算法 1 风电总出力	311.40	314.81	319.68	320.02
算法 2 风电总出力	398.26	415.16	433.87	434.20
算法 3 风电总出力	441.40	440.45	460.00	460.00
算法 4 风电总出力	459.98	459.23	459.94	459.97
算法 5 风电总出力	451.48	456.56	459.39	444.16

从表 2 中数据来看,5 种算法在功率分配后所得到的风电总出力都在 460 MW 以下,从而各风电场功率限值分配后都能保证风电总出力满足要求。但各种功率分配算法所得到的各风电场的实际出力与风电总出力不同,考虑预测的算法要优于其他算

法。不考虑预测数据的算法 1 与 2 的功率限值分别为 316 MW 和 420 MW,在数值上远小于实际要求的 460 MW。考虑风电功率预测的算法 3、4 和 5 的结果比较接近,由它们得到的风电总出力都大于 440 MW,且非常接近功率限值 460 MW,其结果如图 2 所示。

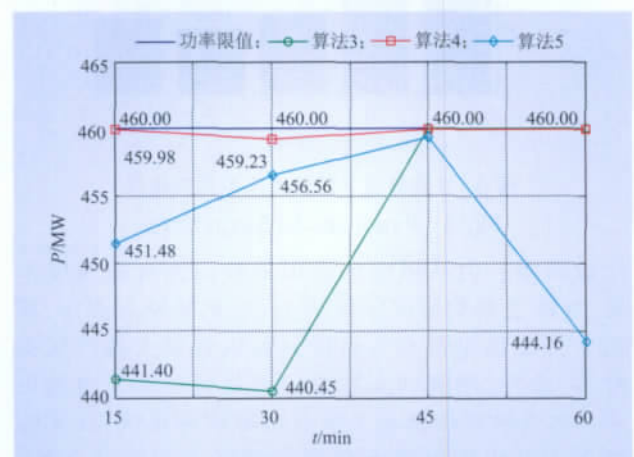


图 2 采用算法 3、4 和 5 的风电总出力结果

Fig. 2 Wind power output for algorithm 3, 4 and 5

从图 2 中可以看出,3 种算法下实际出力非常接近,但由于分配方法不同,各自的变化趋势不同。在这 3 种算法中,算法 4 最为接近于功率限值,同时可以直观地看到其总出力的波动性最小,优化了风力发电的出力波形。

风力发电损失电量为风力发电的预测值与实际值之间的差值电量。风电场的损失电量越多,则其风能损失也就越大,反之就越小。在出现风电总出力限制的情况下,需要做到各风电场限值功率优化分配,保证限电量少,才能充分利用风能,提高风力发电利用率。风力发电损失电量是风力发电功率分配算法是否合理的一个重要的参数。5 种算法下的风电总限电量如图 3 所示。

从图 3 中可以看出,算法 1、算法 2 的限电量较多,而后 3 种算法的限电量明显的少于前 2 种。其中算法 1 比算法 2 高 104 MW·h,算法 3 比算法 4 及算法 5 分别高 9 MW·h 和 2.43 MW·h,而算法 5 比算法 4 高 6.89 MW·h。总体来说,在不考虑风电功率预测时,算法 2 要优于算法 1,而在考虑风电功率预测时,算法 3、4 与 5 很相近,但算法 4 要优于算法 3 和算法 5。5 种算法中,算法 1 的限电量是算法 4 的 7.4 倍。这说明,当风电总出力受限时,若不优化分配各风电场功率限值,将会造成风力发电限电总量过大。同时,若不考虑风电功率预测,提前预分配各风电场功率限值将有很大的盲目性,造成风电限电量过多。

### 3.3 5 种算法的优缺点

算法 1 与 2 不需要风电功率预测系统的支持,



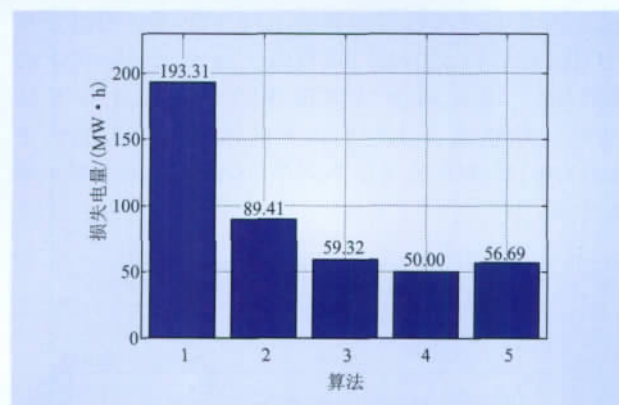


图 3 5 种算法下的风力发电损失电量

Fig. 3 Power loss for 5 algorithms

比较简单,但从风电场总出力及损失电量角度来看,算法 2 要明显优于算法 1。它们的缺点在于:算法 1 分配结果具有盲目性且装机容量大的风场受限多,此外,两者的实际总出力都低且损失电量也多。后 3 种算法是基于风电功率预测系统,在实际总出力及损失电量上都要明显好于前面的 2 种。后 3 种算法结果总体上相差不大,无论从总出力的大小及波动性,还是损失电量上来看,算法 4 都要优于另外的 2 种。它们的缺点在于:算法 3 要求所有风电场都要受限;而算法 4 需设置多个约束条件,比较复杂;算法 5 需综合考虑多类指标,排序的优劣决定了结果优劣。

#### 4 结语

伴随风力发电规模的扩大,系统安全受限时段风电出力限制将成为不可避免的事实。调度要考虑到多个风电场出力叠加具有平滑效应的特性以及风电场控制技术水平,来合理优化功率分配。本文在建立 5 种简单实用的功率分配算法模型的同时

通过实际的算例来比较了 5 种算法的优缺点。比较发现,考虑风电功率预测的算法要明显优于不考虑预测的算法,而在 3 种基于风电功率预测的算法中,算法 4 能最大限度利用风能,使风电场功率分配更加合理,更加经济。

同时,本文的研究虽是基于调峰容量不足所引发的风电总出力受限,但当多个风电场共用输送通道的输送容量不足需限制风电总出力时,也可以应用本文所提出的 5 种算法进行功率分配,其结果与本文所得结论将会一致。

#### 参考文献:

- [1] 李俊峰,施鹏飞,高虎.中国风电发展报告 2010[R].海口:海南出版社,2010.
- [2] 衣立东,朱敏奕,魏磊,等.风电并网后西北电网调峰能力的计算方法[J].电网技术,2010,34(2):129-132.  
YI Li-dong, ZHU Min-yi, WEI Lei, et al. A Computing method for peak load regulation ability of northwest china power grid connected with large-scale wind farms [J]. Power System Technology, 2010, 34 (2):129-132.
- [3] 韩小琪,孙寿广,戚庆茹.从系统调峰角度评估电网接纳风电能力[J].中国电力,2010,43(6):16-19.  
HAN Xiao-qi, SUN Shou-guang, QI Qing-ru. Evaluation of wind power penetration limit from peak regulation [J]. Electric Power, 2010, 43 (6): 16-19.
- [4] 白建华,辛颂旭,贾德香,等.中国风电开发消纳及输送相关重大问题研究[J].电网与清洁能源,2010,26(1):14-17.  
BAI Jian-hua, XING Song-xu, JIA De-xiang, et al. Study of major questions of wind power digestion and transmission in China [J]. Power System and Clean Energy, 2010, 26(1): 14-17.

(责任编辑 李新捷)

### Study on algorithms of power curtailment among wind farms

LIU Wei<sup>1</sup>, HUANG Yue-hui<sup>1</sup>, LIU Chun<sup>1</sup>, FAN Guo-ying<sup>2</sup>, YANG Guo-xin<sup>2</sup>

(1. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China; 2. Jilin Power Grid Corporation, Changchun 130021, China)

**Abstract:** When the wind power output is larger than the maximum system transfer capacity, wind power curtailment is required for operation safety. The smooth effect in multiple wind farms should be considered in power distribution. Five different wind curtailment algorithms were proposed based on the availability of wind power forecast system in a wind farm, and the models were established. The wind power outputs and losses were simulated according to hour-ahead power prediction data. Study results indicate that compared to other algorithms, the power generation models with consideration of forecasts have significant advantages. The test results are useful in decision optimization of wind power dispatching.

**Key words:** wind power generation; wind power curtailment; power limitation

欢迎投稿 欢迎订阅 欢迎刊登广告