

# 风电并网后西北电网调峰能力的计算方法

衣立东, 朱敏奕, 魏磊, 姜宁, 于广亮

(西北电网有限公司, 陕西省 西安市 710048)

## A Computing Method for Peak Load Regulation Ability of Northwest China Power Grid Connected With Large-Scale Wind Farms

YI Li-dong, ZHU Min-yi, WEI Lei, JIANG Ning, YU Guang-liang  
(Northwest China Grid Company Limited, Xi'an 710048, Shaanxi Province, China)

**ABSTRACT:** Along with the growth of numbers of large-scale wind farms connected with Northwest China power grid, based on the feature that Northwest China is rich in hydroelectric resources with good regulation performance and considering characteristics of loads and power sources, a principle for coordinated operation of hydropower stations with wind farms is proposed, and a method to calculate the ability of peak load regulation of wind farms by thermal power plants and hydropower stations instead of wind farms themselves is given. Firstly, according to the principle of coordinated operation of hydropower station with wind farms, the wind power output that can be balanced by hydropower station is derived; then by use of power system operation simulation program the regulation capacity that the thermal power plants can provide for peak load regulation of wind farms is calculated. The proposed method is available for reference to the study on the peak load regulation ability of such power grid, which locates in the region that is rich in hydroelectric resources, while large-scale wind farms are connected with it.

**KEY WORDS:** Northwest China power grid; power system; wind farms connected with power grid; ability of peak load regulation

**摘要:** 随着西北地区风电并网规模的增大, 结合西北水电资源丰富、调节性能好的特点, 考虑负荷特性、电源特性等, 提出了水电与风电协调运行的思路, 给出了水电、火电为风电调峰的调峰能力计算方法。该方法先根据水电与风电协调运行的原理推导水电可平衡的风电出力, 再利用电力系统运行模拟计算程序计算火电可为风电提供的调峰能力。该方法对水电资源丰富地区风电接入后电网调峰能力的研究有借鉴意义。

**关键词:** 西北电网; 电力系统; 风电并网; 调峰能力

## 0 引言

大力开发和利用可再生能源是我国能源可持

续发展战略的重要组成部分, 其中风力发电已经成为发展最快、技术最成熟、商业化前景最好的可再生能源开发方式<sup>[1-5]</sup>。

与水力发电、火力发电等常规发电方式相比, 风力发电最根本的不同点在于其有功出力的随机性、间歇性和不可控性<sup>[6-10]</sup>。这一特点决定了风电并网运行时, 必须由常规电源为其有功出力提供补偿, 以保证对负荷安全可靠地供电。这种对风电有功出力的补偿调节可看作是对负的负荷波动的跟踪, 即对风电“调峰”。

电力系统可接纳风电容量受电网输送能力、调峰能力、稳定水平、电压波动等因素的影响, 其中电网可为风电提供的调峰能力是最根本的制约因素, 与系统负荷特性、电源特性、外送规模密切相关。如果并网风电超过电网可为风电提供的调峰极限, 电网将难以平衡风电出力, 从而造成频率越限, 严重时将导致电网解列。因此, 研究电网可为风电提供的调峰能力, 对于指导风电有序开发、保证电网安全可靠供电具有重要意义。

本文在西北地区大规模风电并网的背景下, 结合西北水电资源丰富、调节性能好的特点, 提出使水电与风电协调运行的思路, 给出水电、火电为风电调峰的调峰能力计算方法。

## 1 西北电网负荷特性

2008年西北电网(包括陕甘青宁4省区)全社会用电量为2114亿kW·h, 最高发电负荷为30.41GW。根据预测, 2010年西北电网全社会需电量为2311亿kW·h, 最高发电负荷将达到35GW。

由于西北地区以工业用电为主, 且冬季寒冷漫长, 所以西北负荷呈现出波动较小、相对平稳、冬

季采暖期相对较高的特性。根据 1998—2008 年西北电网历史负荷特性的分析结果, 综合考虑负荷结构调整、负荷发展速度等因素, 文献[11]给出了西北电网年负荷特性曲线和日负荷特性曲线, 分别如图 1 和图 2 所示。

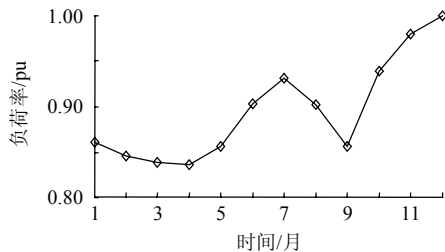


图 1 西北电网的年负荷率

Fig. 1 Annual load rate of Northwest China power grid

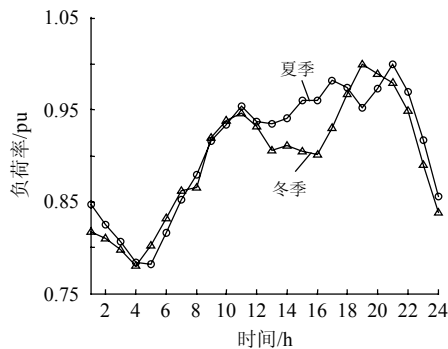


图 2 西北电网的典型日负荷率

Fig. 2 Daily load rate of Northwest China power grid

从图 1 可知, 西北电网年负荷曲线呈现出冬季、夏季双高峰的特点: 年最大负荷出现在冬季 12 月份, 夏季高峰负荷出现在 7 月份, 其与最大负荷的比为 0.931; 年最小负荷出现在 4 月份, 其与最大负荷的比为 0.863。

由图 2 可知, 全网冬季典型日最大负荷出现在 19:00, 最小负荷出现在 04:00, 日最小负荷率为 0.78; 全网夏季典型日最大负荷出现在 21:00, 最小负荷出现在 05:00, 日最小负荷率为 0.782。

## 2 西北电网的电源特性

### 2.1 西北电网概况

2008 年底, 西北电网(包括陕甘青宁 4 省区)总装机容量为 47.108 GW。其中水电装机容量为 11.742 GW, 主要集中在青海和甘肃, 2 省水电装机容量分别占总水电装机容量的 43.2%、39.6%; 火电装机容量为 31.22 GW, 主要集中在陕西、宁夏和甘肃, 上述地区水电装机容量分别占总水电装机容量的 42.7%、23.5%、28.7%; 风电装机容量为 984 MW, 全部集中在甘肃和宁夏, 2 省风电装机容量分别占总风电装机容量的 60.8%、39.2%。

根据预测, 2010 年西北电网常规电源装机容量将达到 71.854 GW, 其中水电装机容量为 21.075 GW, 约占总装机容量的 29.3%, 火电装机容量为 50.779 GW, 约占总装机容量的 70.7%。

### 2.2 水电特性

水电机组出力调整范围大、调整速度快, 同时, 水电厂的运行成本低, 环境污染少, 因此水电厂应尽可能运行在负荷尖峰位置, 为系统提供调峰、调频、事故备用等服务。

西北地区水电资源丰富, 主要集中在黄河干流青铜峡以上河段, 规划有龙羊峡、刘家峡等 25 座大中型梯级水电厂。这些水电厂的运行受装机容量、水库容量、来水量以及河流区间综合用水等多方面因素的制约。

由于刘家峡水电厂受防凌、防汛、社会用水的约束较多, 可用于电网调峰的容量有限, 所以本文认为刘家峡及其下游梯级水电厂参与负荷调峰, 而不参与风电调峰。而龙羊峡—刘家峡梯级水电厂的最小用水需求须满足黄河上游取水泵站进行提水的设计要求, 泵站正常运行是按照龙羊峡水库下泄流量为 300 m<sup>3</sup>/s 设计的, 因此将龙羊峡水库下泄流量 300 m<sup>3</sup>/s 对应的龙羊峡—刘家峡区间水电厂出力作为强迫出力。

### 2.3 火电特性

受锅炉、汽轮机最小技术出力等条件的制约, 火电机组的调整范围较小, 而且, 锅炉、汽轮机等设备受交变应力的限制, 调整速度较慢, 一般凝汽式机组每 min 仅可调整装机容量的 1%左右。对于热电联产机组, 其最小出力和调整速度还要受供热的限制。另外, 火电机组启停不仅耗时较长, 而且要消耗启动能量。以 5 万 kW 高温高压机组为例, 由冷态启动到带满负荷要 6 h, 由热态启动到带满负荷也要 4.5 h。

由于火电机组运行费用高, 环保压力大, 调节性能较水电机组、抽水蓄能机组、燃气轮机组差, 跟踪负荷变化的速度也受到一定的限制, 且火电厂承担变动负荷往往要引起额外的燃料消耗。所以火电厂通常带比较稳定的负荷。

根据规划, 2010 年西北电网火电装机构成中, 燃气机组装机容量为 489 MW, 供热煤电机组装机容量为 8.281 GW, 常规煤电机组装机容量为 42.009 GW, 其中 600 MW 及以上机组装机容量为 17 GW, 300~600 MW 机组装机容量为 17.37 GW, 300 MW 以下

机组装机容量仅为 7.639 MW。

### 2.4 风电特性

#### 2.4.1 甘肃电网的风电特性

根据风电出力特性与负荷特性的关系，可将其看作一个负的负荷，也可以将其当作一种常规电源。

2010 年，甘肃酒泉千万 kW 级风电基地的规划装机容量将达到 5.16 GW。根据文献[12]，酒泉风电基地出力特性全年可分为凌晨峰值、午后峰值、平缓出力及特殊特性 4 种情况。其中凌晨峰值、午后峰值出力特性曲线占全年出力曲线的 77.8%，这 2 种出力特性的风电并网会极大地恶化电网的负荷特性。

因此，酒泉地区风电并网在大部分情况下会恶化电网负荷特性，增大负荷峰谷差。

#### 2.4.2 宁夏电网的风电特性

2010 年，宁夏电网风电的规划装机容量将达到 1.03 GW。通过比较宁夏各风电场年出力特性与宁夏电网负荷特性可知，由于宁夏风电容量较小，出力特性较平缓，因此对电网的负荷特性影响较小。

## 3 水电和火电为风电调峰的方法

### 3.1 水电调峰原理和计算方法

大型可调节水电站是平衡风电出力的天然手段。水电为风电调峰的原理是利用大型水电站水库的调节能力，在风电出力增加时降低水电的出力，在风电出力降低时加大水电出力，使风电与水电出力之和基本保持在一定范围内，即将原本随机的风电出力通过具有调节能力的水电平滑后，形成一个相对稳定的出力，实现风电与水电协调运行。

总体来说，水电站短时的调峰能力可以等效为预想出力与强迫出力的差值，但对于大规模的间歇式风电，除考虑电力外，还应考虑风电电量的影响，只有如此才能保证水电站在长期的调峰过程中不发生因接纳过多风电电量而引起的弃水或因风电电量过少而引起的水电站不能完全平衡的问题。

某水电站日水能资料示意如图 3 所示。图中  $Q$ 、 $P$ 、 $Y$  分别代表水电站的强迫出力、平均出力、预想出力。水电站每日的水电电量包括可调节电量  $W_a$  与强迫电量 2 部分，其中只有  $W_a$  用于平衡风电。当每日风电电量  $W_f$ 、风电最大出力  $F$  已知时，水电平衡风电应补的电量  $W_b$  为

$$W_b = 24F - W_f \quad (1)$$

根据  $W_a$  与  $W_b$  的关系，可判断水电是否能够完全平衡风电，具体分为 3 种情况：

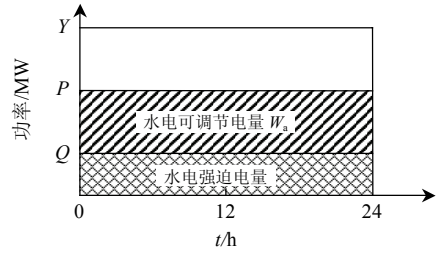


图 3 某水电站日水能资料示意  
Fig. 3 A sketch map of daily hydropower data of the hydropower plant

1) 当  $W_a = W_b$  时，水电可完全平衡风电，但无多余电量参与系统负荷调峰。

2) 当  $W_a > W_b$  时，水电可完全平衡风电，且有多余电量参与负荷调峰。如图 4 所示，可参与负荷调峰的水电电量  $W_{as}$  为

$$W_{as} = 24(P - Q) - F(24 - H) \quad (2)$$

式中： $H$  为风电利用小时数， $H = W_f / F$ 。

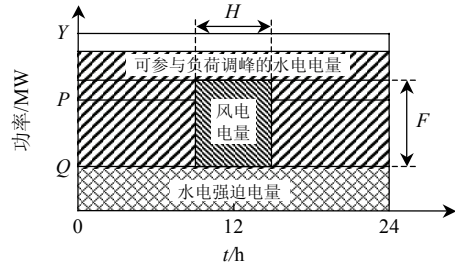


图 4 当  $W_a > W_b$  时多余水电完全平衡风电示意  
Fig. 4 A sketch map that the hydropower fully stabilizes the wind power when  $W_a > W_b$

3) 当  $W_a < W_b$  时，水电无法完全平衡风电，还需火电参与平衡，如图 5 所示，水电可平衡的风电出力  $F_a$  为

$$F_a = [24(P - Q)] / (24 - H) \quad (3)$$

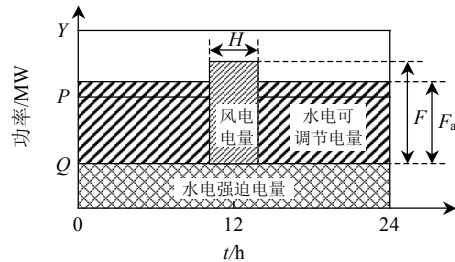


图 5 当  $W_a < W_b$  时水电无法完全平衡风电示意  
Fig. 5 A sketch map that the hydropower can not fully stabilize the wind power when  $W_a < W_b$

需要参与平衡风电的火电电量为

$$W_t = F(24 - H) - 24(P - Q) \quad (4)$$

需说明的是，上述情况均是针对水电最大可调用出力  $(Y - Q) \geq F$  而言的，而当  $(Y - Q) < F$  时，无论风电电量为多少，水电都不能完全平衡风电电量，还需火电参与平衡。

在水电平衡风电的过程中，若水电出力超过预

想出力, 说明水库水位已超过最高水位, 此时需要弃水。但从电力系统实际情况考虑, 不允许水电厂为平衡风电而弃水。当水电厂不弃水时, 如图 6 所示, 水电可平衡的风电出力  $F_b$  为

$$F_b = [24(Y - P)] / H \quad (5)$$

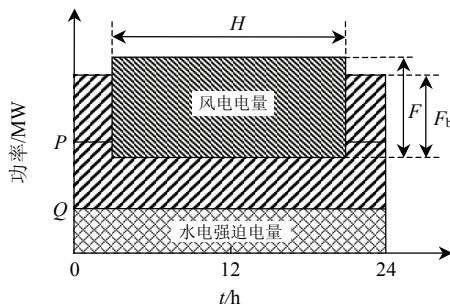


图 6 水电厂不弃水时水电平衡部分风电示意

Fig. 6 A sketch map that the hydropower stabilizes the part of wind power without the hydropower plant abandoning water

### 3.2 火电调峰计算方法

计算出水电可平衡的风电即水电为风电提供的调峰能力后, 再安排各类电厂在系统负荷曲线上的工作位置, 原则如下: 1) 首先安排受外部条件或机组运行技术条件限制的发电出力, 如径流式水电厂、有调节库容水电厂的强迫出力(包括与风电形成风水协调运行的水电出力)等; 2) 其次安排有调节库容水电厂的可调节出力; 3) 系统日负荷曲线上剩余的部分负荷即为火电厂应承担的负荷。

根据电力系统运行模拟计算程序, 模拟系统全年逐月的运行方式和各电厂在系统逐月典型日 24 h 负荷曲线上的工作位置和工作容量, 从而得到小方式下火电的负荷率, 即火电承担系统部分负荷、负荷调峰和旋转备用后的最小出力率。该负荷率下的火电出力与火电最小技术出力之间的差值即为火电可为风电提供的调峰能力。

## 4 结论

1) 随着西北地区风电并网规模增大, 本文结合西北水电资源丰富、调节性能好的特点, 提出了水电优先风电调峰, 火电作为补充的调峰方法。该方法先根据风水协调运行原理推导水电可平衡的风电出力, 再利用电力系统运行模拟计算程序计算火电可为风电提供的调峰能力。

2) 本文的方法将应用于 2010 年西北电网调峰能力研究, 对水电资源丰富地区的风电接入后调峰能力研究有借鉴意义。

## 参考文献

- [1] 尹炼, 刘文洲. 风力发电[M]. 北京: 中国电力出版社, 2002: 29-54.
- [2] 戴慧珠, 陈默子, 王伟胜, 等. 中国风电发展现状及有关技术服务[J]. 中国电力, 2005, 38(1): 80-84.  
Dai Huizhu, Chen Mozi, Wang Weisheng, et al. The status of wind power development and technical supports in China [J]. Electric Power, 2005, 38(1): 80-84(in Chinese).
- [3] 陈炳森, 胡华丽. 我国风电发展概况及展望[J]. 电网技术, 2008, 32(S2): 279-282.  
Chen Bingsen, Hu Huali. General situation and prospect of wind power in China[J]. Power System Technology, 2008, 32(S2): 279-282(in Chinese).
- [4] 迟永宁, 刘燕华, 王伟胜, 等. 风电接入对电力系统的影响[J]. 电网技术, 2007, 31(3): 81-85.  
Chi Yongning, Liu Yanhua, Wang Weisheng, et al. Study on impact of wind power integration on power system[J]. Power System Technology, 2007, 31(3): 81-85(in Chinese).
- [5] 邢文琦, 晁勤. 含不同风电机组的风电电网仿真研究[J]. 电网技术, 2009, 33(7): 103-106.  
Xing Wenqi, Chao Qin. Simulation study on wind power system containing various wind turbine generators[J]. Power System Technology, 2009, 33(7): 103-106(in Chinese).
- [6] 屠强. 风电功率预测技术的应用现状及运行建议[J]. 电网与清洁能源, 2009, 25(10): 4-9.  
Tu Qiang. Existing applications of wind power forecasting technology and relevant suggestions[J]. Power System and Clean Energy, 2009, 25(10): 4-9(in Chinese).
- [7] 王海超, 鲁宗相, 周双喜. 风电场发电容量可信度研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(10): 103-106.  
Wang Haichao, Lu Zongxiang, Zhou Shuangxi. Research on the capacity credit of wind energy resources[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(10): 103-106(in Chinese).
- [8] Bechrakis D A, Deane J P, Mckeogh E J. Wind resource assessment of an area using short term data correlated to a long term data set[J]. Solar Energy, 2004, 76(6): 725-732.
- [9] Wiik J, Gjerde J O, Gjengedal T, et al. Steady state power system issues when planning large wind farms[C]. IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, New York, 2002.
- [10] 陈树勇, 戴慧珠, 白晓民, 等. 风电场的发电可靠性模型及其应用[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(3): 26-29.  
Chen Shuyong, Dai Huizhu, Bai Xiaomin, et al. Reliability model of wind power plants and its application[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(3): 26-29(in Chinese).
- [11] 中国电力工程顾问集团西北电力设计院, 西北电网有限公司. 西北电网“十二五”电网规划设计[R]. 西安: 西北电力设计院, 2009.
- [12] 西北电网有限公司电网技术(培训)中心, 西北电网有限公司风电研究中心. 西北(酒泉)风电出力特性研究[R]. 西安: 西北电网有限公司, 2008.



衣立东

收稿日期: 2009-12-20.

作者简介:

衣立东(1971—), 男, 博士, 高级工程师, 从事高压输电与新能源方面的技术研究及管理工作, E-mail: ild@nw.sgcc.com.cn.

(责任编辑 杜宁)