

# 风电场有功功率分配策略及其实现

胡凯凯, 翟大勇, 夏相春, 陈林, 许力伟

(南车株洲电力机车研究所有限公司, 湖南 株洲 412001)

**摘要:** 当前风电场的有功功率控制分配策略多采用平均分配的方式, 若风电场各机组的风速差异较大, 很可能导致整个风电场的有功功率输出与网调指令存在较大的差距。对此, 综合协调考虑风电机组的控制特性及其当前的平均有功功率、平均风速和运行状态等信息, 提出一种新的有功功率指令分配策略, 有效减小了风电场功率输出与网调指令值的差距, 最大限度地减小限功率对业主造成的损失。

**关键词:** 风电机组; 有功功率; 功率分配

中图分类号: TM315; TM714.2

文献标识码: A

文章编号: 2095-3631(2013)03-0032-03

## Distribution Strategy of Wind Farm Active Power and Its Implementation

HU Kai-kai, ZHAI Da-yong, XIA Xiang-chun, CHEN Lin, XU Li-wei

(CSR Zhuzhou Institute Co., Ltd., Zhuzhou, Hunan 412001, China)

**Abstract:** Currently, average distribution is generally adopted for the active power control instruction of wind farms. If the wind speed differs much among wind turbines in the wind farm, the output active power of the wind farm may as well differ much from the instruction of the electricity grid. For this reason, a new distribution strategy of active power instruction is proposed by integrated consideration on parameters of each wind turbine, including control characteristics, average active power, average wind speed and operating state. This new strategy can effectively reduce the difference between the wind farm output active power and the grid instruction, so as to reduce the loss of wind farm owner due to active power restriction to the possible extent.

**Key words:** wind turbine; active power; power distribution

## 0 引言

近年来, 风电发展十分迅速, 装机容量不断增长。通过对风电场有功功率进行控制, 可以达到稳定输出功率的目的, 进而减小了风力发电的随机性和波动性对电网的不利影响<sup>[1-3]</sup>。

由于整个风电场的各机组风速存在差异, 如果进行平均分配, 很可能导致整个风电场的有功功率输出与网调指令存在较大的差距。本文提出了一种综合协调考虑风电机组的控制特性及其当前的平均有功功率、平均风速和运行状态的有功功率指令分配策略, 以达

到有能力的风机多发、没有能力的风机不发或少发的目标, 有效减小风电场功率输出与网调指令值的差距, 并在实际应用中验证了该策略的效果。

## 1 风电机组的有功功率控制

风电机组的有功功率控制是通过控制发电机电磁转矩来实现的。主控系统根据检测到的风轮转速与给定转速的偏差, 先通过PI调节, 经最佳风能捕获曲线进行限幅, 产生一个给定转矩, 最后在发电机气隙中, 通过变流器产生一个对应的转矩来控制风轮加速或减速, 从而将风机转速维持在期望值附近。

对于双馈型风力发电机组, 主控系统将转矩指令折算为功率指令, 最终以转子电流形式向变流器发送控制命令。

收稿日期: 2012-12-03

作者简介: 胡凯凯(1984-), 男, 工程师, 现从事风力发电SCADA系统的研究开发工作。

双馈发电机稳态运行时的功率关系(忽略损耗)如下:

$$P=T\omega \quad (1)$$

$$P=P_c-sP_c \quad (2)$$

$$\omega=\omega_0(1-s) \quad (3)$$

$$P_r=sP_c=\sqrt{3}U_r I_r \quad (4)$$

$$U_r=s \times U_{Lock} \quad (5)$$

式中:  $P$ ——风机从转轴上输入的机械功率;  $P_c$ ——电磁功率;  $P_r$ ——转差功率;  $s$ ——转差率,  $\omega_0$ ——发电机同步转速;  $U_r$ ——转子线电压有效值;  $I_r$ ——转子线电流有效值;  $U_{Lock}$ ——转子堵转电压;  $T$ ——机械转矩。

根据以上公式,可计算出机械转矩与转子电流的对应关系:

$$I_r = \frac{T \times \omega_0}{\sqrt{3}U_{Lock}} \quad (6)$$

根据式(6)可以得到转矩指令与发电机转子电流指令的折算关系:

$$I_r^* = \frac{\omega_0}{\sqrt{3}U_{Lock}} T^* \quad (7)$$

式中:  $I_r^*$ ——转子电流给定值;  $T^*$ ——转矩给定值。

随着风速不断增大,转矩给定也不断增加。风速加大至额定风速附近,远程监控系统不对风机进行有功调度时,风电机组按最大出力运行,风机的功率达到最大值,变桨系统开始工作,将风机的功率和转速维持在额定值附近。当远程监控系统对风电机组进行有功调度时,主控系统接受监控系统的有功调度指令,并根据当前风速下风机所能发出的最大功率值,来限制风机的最大运行功率。风机变桨系统判断风电机组当前的运行功率,当机组运行功率大于最大运行功率,变桨系统会控制桨叶收桨,减少机组从风中吸收的功率,从而将风机的运行功率稳定在调度指令附近,实现风电机组的限功率运行。

## 2 有功功率分配策略及其实现

### 2.1 参数的预处理

有功功率指令的分配是一个周期性的任务,即每隔一个给定的周期进行一次指令的重新分配过程,设两个相邻指令分配周期有功功率指令之差为:

$$\Delta P_i = P_i - P_{i0} \quad (8)$$

式中:  $P_i$ ——可控风机的有功功率指令;  $P_{i0}$ ——上个周期的可控风机有功功率指令。

根据第  $j$  台可控风机的风速估算其当前的有功能力  $P_{ej}$ , 并计算出可控风机总有功能力  $P_{et}$ 。

$$P_{et} = \sum_{j=1}^N P_{ej} \quad (9)$$

每台可控风机的平均有功功率指令为:

$$P_{ia} = P_i / N \quad (10)$$

式中:  $N$  为风电场可控的风电机组总台数(所谓“可控”,是指该机组处于发电状态)。

有功指令与实际输出功率之差相对有功指令的百分比为:

$$\Delta P = \frac{P_i - P_t}{P_i} \times 100\% \quad (11)$$

式中:  $P_t$ ——风电场实时总有功功率。

### 2.2 有功功率分配策略

有功功率分配策略的基本原理是根据各机组的当前运行状态、有功功率、风速等信息确定分配给每台风机的有功功率指令。

根据有功能力、实时功率和有功指令之间相互关系的不同,按照以下几种情况进行指令预处理和分配,然后调用一个通用的递归分配算法 A。

(1) 若  $P_i \geq P_{et}$ , 即网调的有功功率指令大于可控风机总有功能力,则对可控风机不做有功功率限制;

(2) 若  $P_i \neq P_{i0}$ , 说明  $P_i$  为新指令,调用递归分配算法 A;

(3) 若  $\Delta P < 0$ , 说明输出功率大于有功指令。出现这种现象的原因是由于阻尼转矩的存在,风电机组输出的功率存在不确定性,单台机组的波动值为其额定值的一个百分比。此时,需要根据情况对网调指令进行修正,将指令加上  $\Delta P$  作为新的指令,再使用新的指令进行有功功率分配,即调用递归分配算法 A。

(4) 若  $\Delta P \geq 0$ , 说明输出功率低于有功指令,即少发电,此时需要判断是否为连续少发,若是,要逐步将过程(3)中减去的指令增加回来。若  $\Delta P > \Delta P_m$  ( $\Delta P$  最大阈值),根据修正后的指令调用递归分配算法 A。

### 2.3 递归分配算法 A

输入参数为剩余未分配指令  $P_{ir}$  和剩余未分配的风机数  $N_r$ 。初始化为:  $P_{ir} = P_i$ ,  $N_r = N$ 。

递归执行以下过程:

(1) 根据当前指令和当前可控的风电机组数量,计算出一个平均指令  $P_{ira} = P_{ir} / N_r$ 。

(2) 根据每台可控风机的当前风速计算一个理论输出功率,若其理论输出功率远大于其当前实际功率,则将其理论输出功率作为其指令;否则,以其实际功率逐一和上述平均指令比较,若前者小于后者,则为其分配的指令就是其实际功率;同时统计此过程中被分配的风机数量。

(3) 若过程(2)中被分配的风机数量为 0,则将当前可控的每台风电机组都分配为过程(1)中的平均指令,

并结束分配；否则继续执行过程(3)。

(4) 将当前指令和可控风机数量减去本次递归过程中分配掉的部分，生成新的当前指令和可控风机数量。

(5) 若当前指令和可控风机数量均大于0，则跳到过程(1)；若仅当前指令大于0，则将其平均分配到所有可控风机(在本次分配的基础上增加)，并结束分配过程；若可控风机数量为0，则结束分配过程。

### 3 现场应用效果

上述策略已经用软件实现，并在多个风场进行了测试。图1为指令依次为22, 20, 15, 12, 15, 18, 20 MW的试验中风场总有功功率变化曲线。

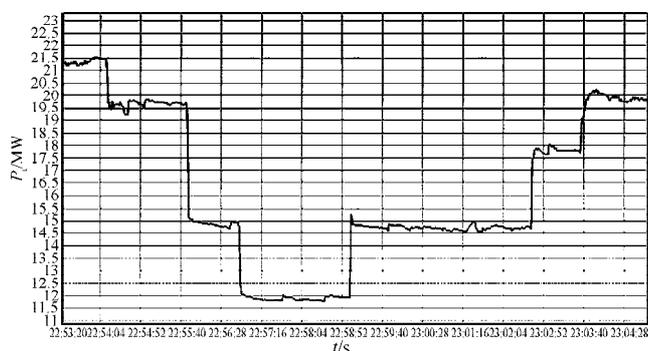


图1 有功功率分配试验中有功功率变化曲线

Fig. 1 The active power curve of active power control test

根据对试验数据的分析，风电场实际有功功率输出和有功功率指令的相对误差小于5%。

### 4 结语

本文提出了一种综合协调考虑风电机组的控制特性及其当前的平均有功功率、平均风速和运行状态的有功功率指令分配策略，有效减小风电场功率输出与网调指令值的差距，保证了风电场尽量按指令值进行平稳的功率输出，并在实际应用中验证了该策略的效果。

### 参考文献:

- [1] 张利, 王成福, 牛远方. 风电场输出有功功率的协调分配策略[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(8): 101-105.
- [2] 邹见效, 李丹, 郑刚, 等. 基于机组状态分类的风电场有功功率控制策略[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(24): 28-32.
- [3] 李静坤, 姚秀萍, 旷瑞明, 等. 新疆风电场有功功率控制策略与实现[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(24): 44-46.

(上接第11页)

### 参考文献:

- [1] 杨校生, 祁和生, 徐涛. 2013年风电产业发展展望[J]. 风能产业, 2013(4): 7-11.
- [2] 周鹏. 双馈异步风力发电系统低电压穿越技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2011.
- [3] 贺益康, 何鸣明, 赵仁德, 等. 双馈风力发电机交流励磁变频电源拓扑浅析[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(4): 105-112.
- [4] Melício R, Mendes V M F, Catalão J P S. Power converter topologies for wind energy conversion systems: Integrated modeling, control strategy and performance simulation [J]. Renewable Energy, 2010, 35(10): 2165-2174.
- [5] 陈瑶. 直驱式风力发电系统全功率并网变流器拓扑结构研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2008.
- [6] ABB Oy. 系统描述和启动指南-ACS800-77LC 全功率风力发电传动(840至3 180 kW)[M]. 北京: ABB 电气传动系统有限公司, 2008.
- [7] Faulstich A, Jürgen K Steinke, Wittwer F. Medium voltage converter for permanent magnet wind power generators up to

5 MW [C]//Dresden:EPE, 2005.

- [8] 国家电监会. 风电安全监管报告2011[R]. 北京: 国家电监会, 2011.
- [9] ABB Oy. ACS800-67 wind turbine converters system description and start-up guide [M/OL]. [2011-12-01]. <http://www05.abb.com/global/scot/scot232.nsf>.
- [10] ABB Oy. ACS800-87LC 风力发电传动硬件手册(背靠背)[M]. 北京: ABB 电气传动系统有限公司, 2009.
- [11] Medium voltage for wind power-PCS 6000[M/OL]. [2010-06-11]. <http://www05.abb.com/global/scot/scot232.nsf/veritydisplay>.
- [12] Convertteam. 强大的风能解决方案[M/OL]. [2011-12-14] <http://www.doc88.com/p-70888717167.html>.
- [13] Holtmark N, Bahirat H J, Molinas M, et al. An All-DC Offshore Wind Farm with Series-Connected Turbines: An Alternative to the Classical Parallel AC Model?[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2012, 60(6): 2420-2428.
- [14] 何大清, 施刚, 吴国祥, 等. 直流串联型风电机组控制策略及仿真分析[J]. 南方电网技术, 2012, 6(6): 100-104.
- [15] 何国庆. 2013分散式风电并网关键技术问题分析[J]. 风能产业, 2013(5): 12-14.