

· 自动化技术 ·

风电场有功功率控制降功率优化算法

邹见效¹, 袁 炆¹, 黄其平³, 郑 刚¹, 曾 斌², 彭 超¹

(1. 电子科技大学自动化工程学院 成都 611731; 2. 四川东方电气自动控制工程有限公司 四川 德阳 618000;

3. 四川省宜宾市江南供电局 四川 宜宾 644000)

【摘要】针对风力发电场有功功率控制过程中风力发电机组频繁启停的问题,提出了一种启停风力发电机组最少的风电场有功降功率控制算法,用于改善风电场输出电力的平稳性,减小对电网的冲击。该算法将风力发电机组按对风电场降功率调整的贡献能力分为可控机组和不可控机组两类,分别建立了可控机组停机数量模型及降功率分配模型。应用实验表明,该算法可以保证风力发电场发电有功功率平稳地下降到调度指令或预设的期望输出功率,改善了风力发电机组出现在运行状态和停机状态之间频繁转换的状况,且减小了风力发电机组的实时有功功率控制的超调量。

关键词 有功功率控制; 优化控制; 风电场; 风力发电

中图分类号 TM761; TM61

文献标识码 A

doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2011.06.015

Optimization Algorithm for Wind Farm Active Power Cutback Control

ZOU Jian-xiao¹, YUAN Yang¹, HUANG Qi-ping³, ZHENG Gang¹, ZENG Bin², and PENG Chao¹

(1. School of Automation Engineering, University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 611731;

2. Sichuan Dongfang Electric Auto-control Engineering Co. Ltd Deyang Sichuan 618000;

3. Yibin Jiangnan Power Supply Bureau of Sichuan Province Yibin Sichuan 644000)

Abstract Aiming to the undesirable switching between running and stop state during the process of active power cutback according to the demands of grid operators or preset value, an active power dispatching algorithm is presented in this paper, which can smooth the wind farm output power and impulse on grid. The wind turbines are divided into two categories of controllable and uncontrollable based on their adjustable margins to the whole active power decreasing adjustment. The models for stopping sets and power dispatching are proposed. The application results indicate that the power dispatching algorithm can make the active power decreasing process accurate and smooth with less wind turbines switching between running and stopping, and reduce the real active power overshoot of wind turbines.

Key words active power control; optimal control; wind farm; wind turbine

风电已具有与传统常规电源发电竞争的潜力,是目前最具有开发利用价值和技术最成熟的一种新能源和可再生能源^[1-2]。大规模风电并网后,由于风电场输出功率的随机性与波动性,电力系统调度和电能质量都面临新的问题^[3-5]。风力发电场有功功率控制算法的研究对电力系统调度和电能质量的保证具有重要意义。

在执行电网调度下达或是预设功率调整命令过程中,可能导致风电场风力发电机组出现频繁启停的情况。而风电机的并网和脱网将给电网带来一定

的冲击,影响电力质量,大规模的启停甚至将影响电网的安全性。在执行降功率调整的过程中,最有可能造成风电机组在停止和启动状态之间的来回切换。文献[6]提出一种分层式的风力发电场有功功率控制算法,在降低功率控制调整分配过程中未考虑风力发电机组降低功率的能力因素。文献[7-9]的风力发电场有功功率控制方法在降低功率的过程中,将期望降低的功率平均分配给每台风力发电机组,有功功率控制误差相对较大。文献[10]的有功功率控制算法将风力发电场期望降低的功率根据每台风力

收稿日期: 2011-02-22; 修回日期: 2011-09-02

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金(ZYGX2010J081)

作者简介: 邹见效(19678-),男,主要从事智能信息处理与控制、新能源控制技术方面的研究。

发电机组发出的实时有功功率占整个风力发电场有功功率的比例进行分配。目前大多数风力发电场有功功率控制算法没有考虑要以保证尽量少的风电机组启停切换为前提,导致在降功率过程中忽略了各机组本身在放电过程中间歇性、发电能力和运行状态的差异,因而可能导致风力发电机组出现频繁启停的问题。

本文提出了一种启停风力发电机组最少的风电场内降功率控制算法,用于改善风电场输出电力的平稳性,减小对电网的冲击,改进有功功率调整模式下风电场内降功率控制过程中风力发电机组频繁启停的问题。

1 降功率控制原理

本文研究对象主要是风电场内降功率调整中功

率下降调整过程的问题。下面讨论的内容选取的是有功功率控制周期中功率下调的情况。风力发电场内降功率控制模型如图1所示。

功率控制算法根据每台风力发电机组的实时功率和预测功率等信息,把期望的输出功率与公共连接点(point of common coupling) P_{cc} 功率测量值的差值 ΔP ,按照既定算法以单台风力发电机组期望输出功率的形式分配给每台可控机组,让每台可控机组根据期望输出功率值进行发电,实现风力发电场的功率控制^[7,11]。功率控制周期设定为30 s。此外,若期望输出功率值过小(以1.5 MW机组为例,假定小于200 kW),实时功率的波动性会导致风力发电机组触发功能故障码而停机,所以功率控制算法规定了一个最小期望输出功率值,由功率控制算法给定每台风力发电机组的期望输出功率不能小于该参数值。

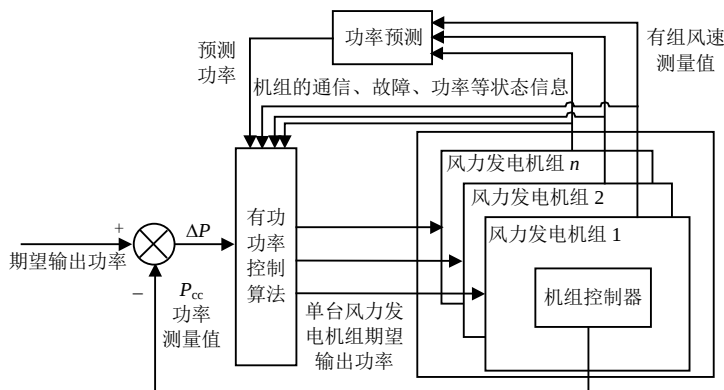


图1 风电场内降功率控制模型

目前应用较为广泛的有直驱型和双馈型等多种类型的变速恒频风力发电机组。各种类型的风力发电机组具有不同的特性,但对于功率控制的响应原理基本相同。机组功率控制模块接收到期望输出功率值后,通过控制发电机转子电流和扭矩,以及速度控制器改变桨叶节矩角的大小来控制发电机转速,使机组按照期望输出功率运行发电。

2 降功率控制算法

功率控制算法为: 1) 风力发电机组分组处理,其算法策略为将全体风力发电机组分为可控机组和不可控机组,并计算每台不可控机组的功率下降值; 2) 计算可控机组在最优运行策略下的停机数量 N ; 3) 计算每台可控风力发电机组的功率下降值。

1) 风力发电机组分组处理。

把风力发电场的风力发电机组分为可控机组和不可控机组两类。可控机组是受降功率控制算法调度的风力发电机组,能够参照期望输出功率值发电;

不可控机组是不受降功率控制算法调度的风力发电机组,所降低的功率不受期望输出功率值支配。其中,可控机组为未发生停机故障,下一控制周期的预测功率值和实施功率值都大于或等于最小期望输出功率值的风力发电机组。不可控机组包括故障停机风力发电机组、低预测功率风力发电机组和低实时功率风力发电机组3类。故障停机风力发电机组是发生停机故障的风力发电机组;低预测功率风力发电机组是下一控制周期的预测功率值小于最小期望输出功率值的风力发电机组;低实时功率风力发电机组是预测功率值大于或等于最小期望输出功率值,并且实时功率值小于最小期望输出功率值的风力发电机组。

在一个降功率控制周期中,故障停机风力发电机组将会完全停止运行。故障停机风力发电机组在下一控制周期的期望功率下降值等于该类风力发电机组实时功率之和,记为:

$$\Delta P_1 = \sum_{i=1}^{n_1} P_{1i} \quad (1)$$

式中, n_1 为故障停机风力发电机组的数量; P_{1i} 为一台风力发电机组的实时功率值。低预测功率风力发电机组在下一控制周期的期望功率下降值等于该类风力发电机组实时功率值与下一控制周期预测功率值之差, 记为:

$$\Delta P_2 = \sum_{i=1}^{n_2} (P_{2i} - P_{2i}^{\text{avail}}) \quad (2)$$

式中, n_2 为低预测功率风力发电机组的数量; P_{2i} 和 P_{2i}^{avail} 分别表示一台风力发电机组的实时功率值和预测功率值。低实时功率风力发电机组在下一控制周期的期望功率升高值等于该类风力发电机组最小期望输出功率值与实时功率值之差, 记为:

$$\Delta P_3 = \sum_{i=1}^{n_3} (P_{\min} - P_{3i}) \quad (3)$$

式中, n_3 为低实时功率风力发电机组的数量; $P_{\min}$ 和 P_{3i} 分别表示一台风力发电机组的最小期望输出功率值和实时功率值。由此可知, 不可控风力发电机组在下一控制周期的期望功率下降值为:

$$\Delta P_{\text{unctr}} = \Delta P_1 + \Delta P_2 - \Delta P_3 \quad (4)$$

2) 可控机组停机数量的计算。

可控机组实时功率总值与最小期望输出功率总值的差值为:

$$\Delta P_{\text{ctrun}} = \sum_{i=1}^m (P_{\text{ctri}} - P_{\min}) \quad (5)$$

则可控机组的停机数量 N 可表示为:

$$N = \frac{\max\{\Delta P - \Delta P_{\text{unctr}} - \Delta P_{\text{ctrun}}, 0\}}{\frac{1}{m}(P_{\text{ctreal}} - \Delta P_{\text{ctrun}})} \quad N \geq 0 \quad (6)$$

式中, ΔP 为风力发电场需要降低的功率值; ΔP_{unctr} 为全体不可控风力发电机组的功率下降值; P_{ctreal} 为全体可控风力发电机组的实时功率值; m 为可控风力发电机组的数量。

证明 可控机组的停机数量与停止运行一台可控风力发电机组所降低功率的乘积, 等于风力发电场在全体风力发电机组不停机降功率的前提下还需要降低的功率。根据该分析, 在一次降功率调控中, 式(6)中的参数 ΔP 、 m 、 ΔP_{unctr} 和 P_{ctreal} 为定值, ΔP_{ctrun} 为全体可控风力发电机组在不停机前提下的功率下降值, 只有当 ΔP_{ctrun} 取值最优时, 才能保证 N 最小。

1) 若 $\Delta P - \Delta P_{\text{unctr}} - \Delta P_{\text{ctrun}} < 0$, 则 $N = 0$, 显然, 此时 N 为最小值。

2) 若 $\Delta P - \Delta P_{\text{unctr}} - \Delta P_{\text{ctrun}} \geq 0$, 则 N 可表示为:

$$N = \frac{\Delta P - \Delta P_{\text{unctr}} - \Delta P_{\text{ctrun}}}{\frac{1}{m}(P_{\text{ctreal}} - \Delta P_{\text{ctrun}})} \quad (7)$$

令 $a = \Delta P - \Delta P_{\text{unctr}}$, $b = P_{\text{ctreal}}$, $x = \Delta P_{\text{ctrun}}$, 则式(7)可变形为:

$$N = m + \frac{m(b-a)}{x-b} \quad (8)$$

对式(8)求导可得:

$$\dot{N} = \frac{-m(b-a)}{(x-b)^2} \quad (9)$$

因为 a 表示可控机组需要降低的功率值, b 表示可控机组的实时功率总值, 显然, $b > a$, 即 $\dot{N} < 0$, $N(x)$ 为单调递减函数。当 x 等于最大值时, 即 ΔP_{ctrun} 等于可控机组实时功率总值与最小期望输出功率总值的差值时, $N > 0$ 且最小。

由此, 式(5)、式(6)计算出的可控机组的停机数量 N 等于最小非负整数, 保证了风力发电场各机组处于最优化的运行状态。证毕

3) 可控机组降功率计算。

根据已经计算出的可控机组停机数量 N , 选定 N 台可控风力发电机组, 对其执行停机操作。

任意一台停机的可控风力发电机组的功率下降值等于该台风力发电机组的实时功率值, 记为:

$$\Delta P_{\text{ctrstopi}} = P_i \quad (10)$$

式中, P_i 为一台风力发电机组的实时功率。任意一台未停机的可控风力发电机组的功率下降值为:

$$\Delta P_{\text{ctruni}} = (\Delta P - \Delta P_{\text{unctr}} - N P_{\min}) \frac{P_i - P_{\min}}{\sum_{j=1}^u (P_j - P_{\min})} \quad (11)$$

式中, ΔP 为风力发电场需要降低的功率值; ΔP_{unctr} 为全体不可控风力发电机组的功率下降值; $P_{\min}$ 、 P_j 分别表示一台风力发电机组的最小期望输出功率值和实时功率值; m 为可控风力发电机组的数量。全体可控风力发电机组的功率下降值为:

$$\Delta P_{\text{ctr}} = \sum_{i=1}^N \Delta P_{\text{ctrstopi}} + \sum_{i=1}^{m-N} \Delta P_{\text{ctruni}} \quad (12)$$

由式(1)~式(3), 式(4)计算出不可控机组的功率下降值 ΔP_{unctr} , 由式(10)~(12)计算出可控机组的功率下降值 ΔP_{ctr} 满足 $\Delta P = \Delta P_{\text{ctr}} + \Delta P_{\text{unctr}}$ 。

3 应用及讨论

现将本文的降功率优化算法应用于实际风力发电场, 并与按比例降功率控制算法^[10]进行比较。

实验场所为河北张北绿脑包风力发电场。参与

单个实验的风力发电机组为41台, 每台风力发电机组均为双馈变速恒频风力发电机组, 发电容量为1 500 kW。现场风速在7~14 m/s之间变化。降功率控制周期为30 s。风力发电机组的最小发电功率为200 kW, 当风力发电机组的实际发电功率小于该值时, 将触发低于最低发电功率故障而停机。

利用本文提出的降功率优化算法和按比例降功率控制算法进行风力发电场功率降低控制实验。风电场实时发电功率初始为27 000 kW左右, 不断减低期望输出功率值, 直到总实时功率值下降到5 000 kW为止。控制实验效果图如图2、图3所示。

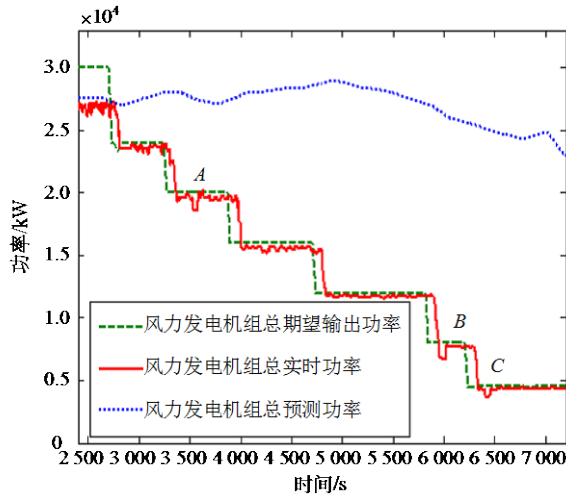


图2 按比例降功率算法控制实验效果图

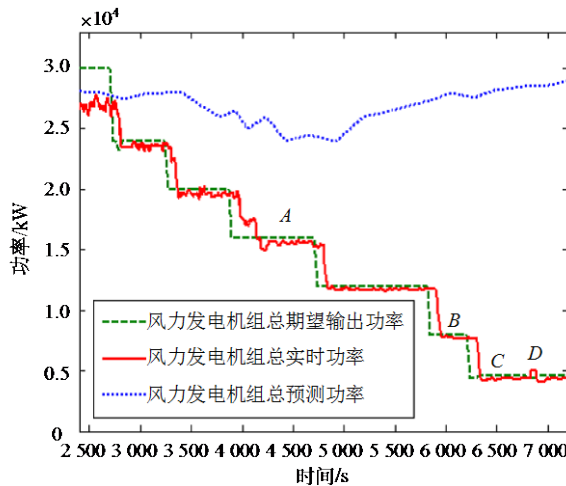


图3 降功率优化算法控制实验效果图

从两个控制效果图可知, 风力发电机组的总实时功率值基本上跟随总期望输出功率值呈阶梯状下降。当总期望输出功率值高于总预测功率时, 风力发电机组处于最大发电能力状态。现分析图中所标记点附近的功率控制情况。

A点: 两种降功率控制算法实验过程中, 在该点分别都有一台风力发电机组发生停机故障, 总实时

功率分别下降约900 kW和1 000 kW, 约50 s后, 总实时功率分别回升到20 000 kW左右和16 000 kW左右。按比例分配降功率控制算法和本文的降功率控制算法均有消除由故障停机风力发电机组所带来的干扰的能力。

B点: 总期望输出功率值为8 000 kW。按比例降功率算法控制实验中, 在该点有7台风力发电机组由于期望输出功率值小于200 kW而发生停机故障, 由正常发电状态变为故障停机状态。总实时功率下降921 kW, 约50 s后, 总实时功率回升到8 000 kW左右。在发生停机故障之前, 7台风力发电机组的期望输出功率值如表1所示。

表1 7台停机风力发电机组期望输出功率值(单位: kW)

风力发电机组ID	发生停机故障前一控制周期的实时功率值	期望输出功率值
7	235	153
11	260	160
14	204	131
20	211	117
34	201	106
36	214	120
39	209	134

本文的降功率优化算法控制实验中, 在该点由本文的降功率控制算法的步骤1)进行风力发电机组分组处理可知, 41台风力发电机组中, 存在36台可控机组和5台不可控机组。其中, 不可控机组中包含1台故障停机风力发电机组, 2台低预测功率风力发电机组和2台低实时功率风力发电机组。故障停机风电机组的期望输出功率为0 kW, 低预测功率风力发电机组和低实时功率风力发电机组的期望输出功率均为最小期望输出功率200 kW。由步骤2)计算出可控机组在最优运行策略下的停机数量 N 等于零。由步骤3)计算出全部可控机组的期望输出功率均为200 kW。在B点, 除了一台在A点故障停机的风力发电机组外, 其余40台风力发电机组均正常发电。每台的期望输出功率均为200 kW, 没有风力发电机组从正常发电状态转变为停机状态。各台风力发电机组的状态和期望输出功率值如表2所示。

表2 全体风力发电机组期望输出功率值(单位: kW)

风力发电机组类别	风力发电机组ID	预测功率值	上一控制周期实时功率值	期望输出功率值
故障停机风力发电机组	22	631	0	0
不可控机组	低预测功率风力发电机组	7	156	233
	低实时功率风力发电机组	34	174	209
	低实时功率风力发电机组	11	211	125
	低实时功率风力发电机组	39	228	176
可控机组	...	...	...	200
可控机组	...	...	...	200

C点:总期望输出功率值为5 000 kW。

按比例降功率算法控制实验中,在该点有11台风力发电机组由于期望输出功率值小于200 kW而发生停机故障,由正常发电状态变为故障停机状态。总实时功率下降515 kW,约50 s后,总实时功率回升到5 000 kW左右。

本文的降功率优化算法控制实验中,在该点的降功率控制算法计算出可控机组在最优运行策略下的停机数量 N 等于15。除一台在A点的停机的风力发电机组外,计算得出的15台可控机组的期望输出功率值为0 kW,其余25台风力发电机组的期望输出功率值为200 kW。

D点:一台故障风力发电机组因为故障恢复而自动起机,总实时功率上升大约700 kW,约50 s后,总实时功率回降到5 000 kW左右。本文的降功率控制算法有消除由风力发电机组突然起动发电所带来的干扰的能力。

对两种算法进行详细综合比较,比较结果如表3所示。

表3 两种降功率控制算法综合比较结果

比较项目	比例降功率 控制算法	本文的降功率 优化算法
在B点累计停机数量/台	8	1
在C点累计停机数量/台	19	16
总实时功率的 平均稳态误差/(%)	2.55	2.29
由于风力发电机组自动停机或起机所 产生的总实时功率最大扰动误差/(%)	4.50	5.25
由于总期望输出功率值的改变所产生 的总实时功率值最大超调量/(%)	13.81	3.84

由表3可知,无论在B点还是C点,与按比例降功率控制算法比较,本文的降功率优化算法累计控制停机数量都要少,避免了风力发电机组在运行状态和停机状态之间频繁切换。两种算法中,总实时功率的平均稳态误差基本相等,由风力发电机组自动停机或起动所产生的总实时功率最大扰动误差也相差不大,这是因为两个误差主要取决于风力发电机组自身对于降功率控制响应的特性,与算法类别关系不大。比较由于总期望输出功率值的改变所产生的总实时功率值最大超调量,本文的降功率优化算法明显优于比例降功率控制算法。

4 结 论

本文将尽量避免风电机组频繁启停作为约束条件引入风力发电场有功功率控制策略中。从机组优化运行及减少对电网冲击的角度,给出了一种针对

有功功率降功率调整控制的功率控制算法。应用实验表明,该算法可以保证风力发电场发电有功功率平稳地下降到风力发电场的期望输出功率,避免了风力发电机组在运行状态和停机状态之间频繁切换,且减小了风力发电机组的实时有功功率控制的超调量。

参 考 文 献

- [1] STUPIN P. Doubly-fed wind power generator with 5.6 MW[J]. Converter Technology & Electric Traction, 2006, 6: 39-42.
- [2] 王芝茗, 苏安龙, 鲁顺. 基于电力平衡的辽宁电网接纳风电能力分析[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(3): 86-90. WANG Zhi-ming, SU An-long, LU Shun. Analysis on capacity of wind power integrated into liaoning power grid based on power balance[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(3): 86-90.
- [3] AKHMATOV V, KNUDSEN H. An aggregate model of a grid-connected, large-scale, offshore wind farm for power stability investigations-importance of windmill mechanical system[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2002, 24(9): 709-717.
- [4] 王丽婕, 冬雷, 胡国飞, 等. 基于多嵌入维数的风力发电功率组合预测模型[J]. 控制与决策, 2010, 25(4): 577-586. WANG Li-jie, DONG Lei, HU Guo-fei. Combined prediction of wind power generation in multi-dimension embedding phase space, 2010, 25(4): 577-586.
- [5] 乔颖, 鲁宗相. 考虑电网约束的风电场自动有功控制[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(22): 88-93. QIAO Ying, LU Zong-xiang. Wind farms active power control considering constraints of power grids[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(22): 88-93.
- [6] 惠晶, 顾鑫. 大型风电场的集中功率控制策略研究[J]. 华东电力, 2008, 36(6): 57-60. HUI Jing, GU Xing. Research on centralized power control strategies for large wind farms[J]. East China Electric Power, 2008, 36(6): 57-60.
- [7] TARNOWSKI G C, REGINATTO R. Adding a active power regulation to wind farms with variable speed induction generators[C]//Proceedings of IEEE Power Engineering Society General Meeting. Tampa, FL, USA: IEEE, 2007: 1-8.
- [8] 陈宁, 于继来. 基于电气剖分信息的风电系统有功调度与控制[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(6): 51-58. CHEN Ning, YU Ji-lai. Active power dispatch and regulation of wind power system based on electrical dissecting information of electric power network[J]. CSEE, 2008, 28(6): 51-58.
- [9] HANSEN A D, SORENSEN P, IOV F, et al. Centralised power control of wind farm with doubly fed induction generators[J]. Renewable Energy, 2006, 31(7): 935-951.
- [10] SØRENSEN P, HANSEN A D. Wind farm models and control strategies[R]. Roskilde, Denmark: Risø National Laboratory, 2005.
- [11] LUO Chang-ling, BOON-TECK O. Frequency deviation of thermal power plants due to wind farm[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2006, 21(3): 708-716.

编辑 漆 蓉