

南非风电场有功储备模式下的功率滚动平滑控制

张文建¹, 褚景春², 袁 凌², 潘 磊², 潘海宁²

(1. 国家能源投资集团有限公司, 北京 100034;

2. 风电设备及控制国家重点实验室(国电联合动力技术有限公司), 北京 100039)

摘 要: 以风电场有功和无功功率指令跟踪为控制目标,以风电机组设计极限和机端电压为约束条件,提出有功储备模式下考虑场内电压稳定的风电场功率分配方案,结合超短期风功率预测,实现风电场功率的高精度滚动控制。该文的控制策略成功应用于南非 245 MW 大型风电项目,经现场测试验证,其可有效降低该风电项目并网点的功率波动,提高场内电压稳定,保障该风电项目顺利通过南非电网公司的现场测试并进入商业化运行。

关键词: 风电场; 电压稳定; 功率控制; 能量管理

中图分类号: TM6

文献标识码: A

0 引 言

大型风电场接入弱电网的条件下,风电场内部拓扑结构和风电机组的功率分配方式对风电场电压稳定和运行方式有严重影响,易造成风电机组电压超限,甚至导致风电场内电压振荡超限而引起风电机组部件烧毁。南非风资源较好,但电网结构稳定性相对较弱,要求风电场能在有功储备方式下运行,同时还要具有无功控制能力。此时,风电机组的有功最大化已不是风电场功率控制亟待解决的问题,而无功优化分配问题因为会影响到风电场发电的平稳性和精度,其优先程度应高于有功控制。

目前,风电场内风电机组的有功调度策略主要按额定容量和按最大有功功率值 2 种原则进行分配,文献[1]提出以风电机组可调节裕度、调节速率和风电机组利用小时数为参考量的风电机组调节性能衡量方法,并据此决定风电机组有功调节的优先顺序。文献[2]通过对风电机组状态功率升降能力的评估将风电机组进行分类,从而提高风电场有功控制的准确性和平稳性。文献[3]在此基础上提出以降低风电机组调节频度为原则的有功控制策略,从而避免过于频繁的调节对风电机组带来的损伤。文献[4]以减小机组机械损耗为目的,采用 Glowworm Metaphor 算法优化计算风电机组组合。

文献[5]针对风电场运行时大量无功传输会引起有功损耗增加的问题,提出在保证最大风能利用的前提下将双馈风电机组作为连续无功源参与风电场无功补偿的方式。文献[6]考虑机组状态可能存在的差异,提出基于风电机组的状态分类模型,实现风电场功率的平滑输出,主要基于相邻调控周期风电机组运行状态的变化情况,未考虑风速变化趋势。

可见,多数针对风电场能量控制方法通过在目标函数中加入惩罚项的方法避免在功率分配过程中出现电压越限,但无功控制精度受惩罚项系数的影响,对于功率控制精度高的场合,一旦风电机组电压出现越界,会触发风电机组发生电压穿越过程,导致风电机组的有功/无功及机端电压出现跳变,会导致优化求解问题不收敛。

本文针对风电场功率控制问题,提出一种结合超短期风功率预测的风电场功率分级控制方法。首先,根据南非电网对功率控制精度要求高的特点,以风电场总的无功出力满足导则要求为约束条件,以机组电压稳定为优化目标,确定无功分配方案;然后,以提高风电场调度响应精度、降低功率波动为控制目标,研究风电场在限功率条件下的有功优化分配方案,以功率分配指令和风电机组发电状态为约束进行滚动优化控制。并根据风电场实时

收稿日期: 2018-12-03

基金项目: 国家科技支撑计划(2015BAA06B03); 国家能源集团科技项目(风电机组智能控制关键技术研究)

通信作者: 张文建(1964—), 男, 硕士、高级工程师, 主要从事电力系统及风力发电技术等方面的研究。20031353@chnenergy.com.cn

有功功率数据反馈,从而整体提高有功功率预测精度。

1 风电场无功优化的数学模型

由于风电场接入弱电网时对并网点电压的支撑作用,风电机组机端电压在极限值附近波动会导致风电场内节点电压越限而引起功率跳变,必须采用无功优先的方法保证场内电压稳定。

1.1 目标函数

无功优化目标函数是风电场在跟踪调度无功功率控制指令的前提下,使所有风电机组的端电压在正常工作区间,即风电机组不进入电压穿越状态,保证并网点的无功功率不发生跳变和波动。无功优先的目标函数应能改善风电场内部各个节点的电压质量:

$$\min f(Q) = \min \lambda \sum_{i=1}^{n_0} f(U_i(P, Q)) \quad (1)$$

式中, n ——风电场内部系统的节点总数; n_0 ——无功调节可用风电机组总数; U_i 、 U_j ——支路首端节点 i 和支路末端节点 j 的电压幅值,为计算方便,公式中的变量用标幺值表示,后续不再说明; θ_{ij} ——节点 i 和 j 的电压相角差; λ ——电压越限惩罚因子; $U_{i,\max}$ 、 $U_{i,\min}$ ——节点 i 的电压幅值上限和下限,并有:

$$f(U_i) = \begin{cases} (U_i - U_{i,\min})^2, & U_i < U_{i,\min} \\ 0, & U_{i,\min} \leq U_i \leq U_{i,\max} \\ (U_i - U_{i,\max})^2, & U_{i,\max} < U_i \end{cases} \quad (2)$$

$$Q = [Q_1, Q_2, \dots, Q_n] \quad (3)$$

1.2 约束条件

风电场内风电机组的机端节点电压应满足电压传递方程:

$$U_j = U_i - \frac{(P_i + P_\Sigma)R_{ij} + (Q_i + Q_\Sigma)X_{ij}}{U_i} - j \frac{(P_i + P_\Sigma)X_{ij} + (Q_i + Q_\Sigma)R_{ij}}{U_i} \quad (4)$$

式中, P_i 、 Q_i ——节点 i 的有功功率和无功功率; R_{ij} 、 X_{ij} ——节点 i 和 j 之间的电阻和电抗。

令 Q_{POC} 为并网点的无功功率、 Q_{loss} 为风电场内有功功率的损耗值,包括线路损耗和变压器损耗,

则有:

$$Q_{\text{POC}} = \sum_{j=1}^n Q_j - Q_{\text{loss}} \quad (5)$$

$$U_{i,\min} \leq U_i \leq U_{i,\max} \quad (6)$$

$$Q_{Gi,\min} \leq Q_{Gi} \leq Q_{Gi,\max} \quad (7)$$

式中, P_{di} 、 Q_{di} ——节点 i 的有功负荷和无功负荷; θ_{ij} ——节点 i 和 j 的电压相角角度差; $Q_{Gi,\max}$ 、 $Q_{Gi,\min}$ ——第 i 台风电机组发出无功功率的上限值和下限值; $P_{Gi,\max}$ 、 $P_{Gi,\min}$ ——第 i 台风电机组发出有功功率的上限值和下限值。

2 风电场有功控制的数学模型

本文的有功控制目标是以风电机组能力、机组端电压水平为衡量指标,对风电场内的风电机组进行分组/分群,从而避免在跟踪调度指令时出现负荷分配不合理。

2.1 目标函数

风电场内部的风电机组通常存在数量较多、分布范围较广等情况,导致部分风电机组控制系统频繁动作,运行状态切换次数增加,造成风电功率输出可靠性降低,机械损耗增加,从而间接增加风力发电成本。因此,设定功率控制目标函数如式(8),最大程度减轻出力变化,降低风电机组损耗,即:

$$f(P) = \min \sum_{i=1}^T (P_{i+1}^{\text{ref}} - P_i)^2 \quad (8)$$

式中, P_{i+1}^{ref} —— $i+1$ 时刻的有功分配指令; T ——控制时域长度。

2.2 约束条件

在风电机组分群的基础上针对各层控制分工和有功功率控制目标分别建立数学模型,并对系统和风电机组的有功功率约束进行模型化表示。约束条件包括:

$$P_i^{\min} \leq P_i^{\text{ref}} \leq P_i^{\max} \quad (9)$$

$$P_{\text{POC}} = P^{\text{ref}} = \sum_{i=1}^{n_p} P_i^{\text{ref}} - P_{\text{loss}} \quad (10)$$

风电机组与升压站的距离不同,则风电机组无功功率输出对机端电压的影响不同。当风速变化引起风电机组无功输出增加时,考虑风电机组自身定转子参数限制,风电机组的有功输出限值也应该随之进行调整。有功和无功能力的设计极限之间

有如式(11)的关系:

$$P_i^{\max} = \sqrt{\left(\frac{3}{2} \frac{X_m}{X_s} U_s I_{r\max}\right)^2 - \left(\frac{3U_s^2}{2X_s} + Q_{Gi}\right)^2} \quad (11)$$

式中, U_s 、 X_s 、 X_m 、 $I_{r\max}$ ——定子电压、定子电抗、励磁电抗和转子侧电流最大值。

2.3 基于运行边界约束的风电机组分群方法

根据风电场内风电机组能力指数确定分群标准。风电机组能力指数为衡量风电机组参与风电场有功功率控制能力的技术参数,其数值大小取决于风电机组的未来一段时间内的可利用功率和当前的负荷率 α ,并有:

$$\alpha = \frac{Q_{\text{actual}}}{Q_N} \quad (12)$$

式中, Q_{actual} ——风电场实际无功出力; Q_N ——风电场额定无功容量。

有功预留控制针对风电场处于高风速区间,此时风电场降功率能力充裕,风电机组运行功率较高。高风速区间内,风电场中 $W_{j,t+1}>0$ 类风电机组能力指数大于预留功率要求,优先参与调度; $W_{j,t+1}<0$ 类风电机组的能力指数低,应避免频繁升降,保持原功率; $W_{j,t+1}=0$ 类风电机组逐台停机,总调节能力为该风电机组实时功率之和:

$$P_{W_{j,t+1}=0} = \sum_{j=1}^{n_{W_{j,t+1}=0}} P_{sj,t} \quad (13)$$

式中, $n_{W_{j,t+1}=0}$ ——在 $t+1$ 时段的 $W_{j,t+1}=0$ 类风电机组队列; $P_{W_{j,t+1}=0}$ —— $W_{j,t+1}=0$ 类风电机组在 $t+1$ 时段总调节能力; $P_{sj,t}$ ——风电机组 j 在第 t 时段的实时功率,即风电机组 j 在第 $t+1$ 时段初始时刻功率。 $W_{j,t+1}>0$ 类风电机组参与下降控制,可下降到最大发电能力和风电机组最小发电能力。 $P_{sj,t}$ 为风电机组 j 在第 t 时段实时功率,即风电机组 j 在第 $t+1$ 时段初始时刻功率。

3 风电场功率优化调度系统结构

为了发挥模型预测控制方法在控制稳定性和处理多约束条件的能力,在进行超短期风电功率预测的基础上,本文提出在控制分层的基础上实现分级滚动优化,实现实际数据的实时反馈和单机终端反馈校正,从而提高系统的控制稳定性和精确度。为降低风电机组数量较多带来的优化计算过于复

杂及风电场功率调度值波动影响过大等问题,本文通过无功优先抑制风电机组状态频繁切换的思想,根据风电机组负荷和未来发电状态对风电机组进行分群,并在各机群内建立独立而有针对性的有功滚动优化模型,从而降低计算的复杂程度和风电机组调度指令的波动次数。

功率滚动优化控制系统的结构如图1所示,场站优化分配层根据超短期风电功率组合预测模型的预测结果,以15分钟/次的频率滚动优化计算各机群有功功率负荷分配调度值。分群控制层根据风电机组负荷及未来发电状态每15分钟进行一次机群的重新划分,并以1秒/次的频率计算本机群内风电机组的有功功率负荷分配指标。风电机组功率控制系统根据功率分配指令对风电机组进行0.2 s频率的调度指令追踪滚动优化和实时反馈校正。从风电场的整体角度看,数值天气预报数据为输入数据,系统调度计划为控制目标,计算得到的风电机组负荷分配控制目标为输出变量。

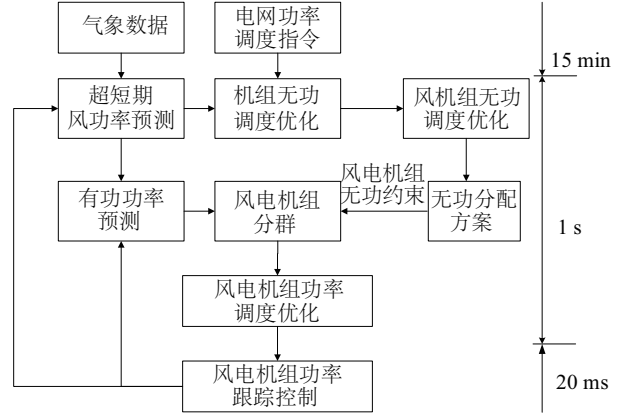


图1 功率滚动优化控制系统结构

Fig. 1 Structure of progressive predictive control

4 南非德阿风电项目方法应用与分析

本文以南非德阿风电项目为例,分析并验证优化方法的控制效果。南非德阿风电项目是中国在非洲第一个集投资、建设、运营为一体的风电项目。风电场总装机容量245 MW,选用163台1.5 MW双馈风电机组,所有风电机组均通过0.69/33 kV升压变分别接入风电场中压集电线路,升压站汇流母线分2段运行,每段汇流母线拥有1台33/132 kV变压器,2台主变并列运行,然后整个风电场通过1回

132 kV 线路并入电网。以该项目一期风电场为例,其电气系统一次接线系统如图 2 所示,风电场的风电机组分别通过 5 条集电线路输送至升压站,为了方便绘图,将每条集电线路上的风电机组封装为一台等效机组,等效机组包含详细的集电线路和风电机组的模型和参数。

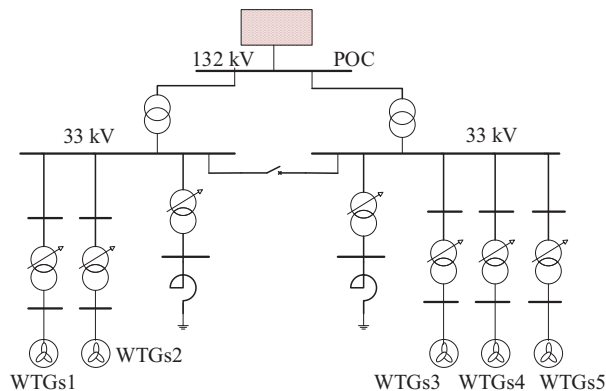


图 2 风电场电气拓扑图

Fig. 2 Electrical topology of wind farm

4.1 仿真计算与分析

南非风电并网导则对功率控制的精度要求为设定值的 2% 或整场容量的 0.5%。本文考虑根据风电场实时功率状态及 15 min 分辨率风电预测功率,每 1 秒对风电机组进行动态分类形成优先度排序,使风电机组按优先度排序依次参与功率分配,从而提高风电场有功控制滚动优化的准确性。图 3 详细介绍了仿真过程中本文所述方法的执行过程。仿真初始时刻,设定电网调度指令为有功功率 50 MW,

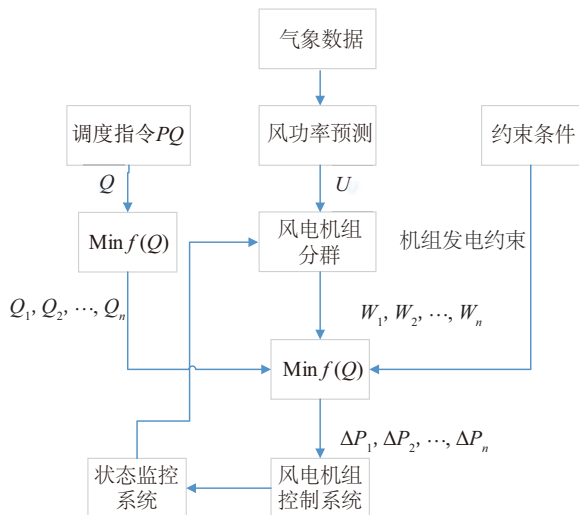


图 3 风电机组有功分配过程

Fig. 3 Active power dispatching process

无功功率 32 Mvar, 并网点电压 1 pu, 根据本文无功优先的控制方法, 如图 4 所示, 受集电线路长度及风电机组出力的影响, 无功功率对各风电机组的电压影响不同, 远端的风电机组电压较容易波动, 故其无功出力经优化后普遍较小, 如编号为 38~42 的风电机组。

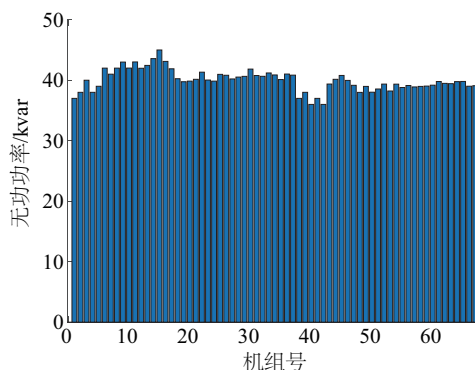


图 4 无功功率出力分配

Fig. 4 Reactive power optimization dispatching

4.2 现场实测结果与对比分析

为验证本文所述风电场功率滚动优化控制方法, 在南非德阿风电场实际测试该方法的控制效果, 图 5 为南非风电项目外景, 图 6 为风电场功率控制现场测试的场景, 测试时风速高于 8 m/s, 满足南非并网导则关于并网测试的风况要求。现场测试以升压站能量管理系统为平台, 屏蔽电网功率调度指令, 以当地硬盘存储的功率序列为电网调度输入, 时间序列指令周期为 1 s。现场测试包含有功和无功控制共 7 项测试, 由南非电网公司 Eskom 组织进行, 现场录波数据以 1 s 时间间隔存储并作为并网性能评估的唯一参考数据。图 7 中, 带“*”标的曲线是未开启有功预留模式下的有功功率控制; 带“x”标的曲线为有功储备模式下的控制指令; 带



图 5 南非德阿风电项目现场外景

Fig. 5 De Aar wind energy project in South Africa

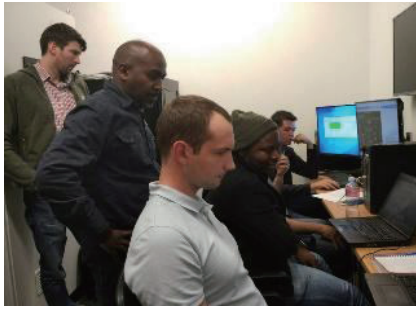


图6 南非项目风电场功率控制现场测试

Fig. 6 On-site test of De Aar wind energy project

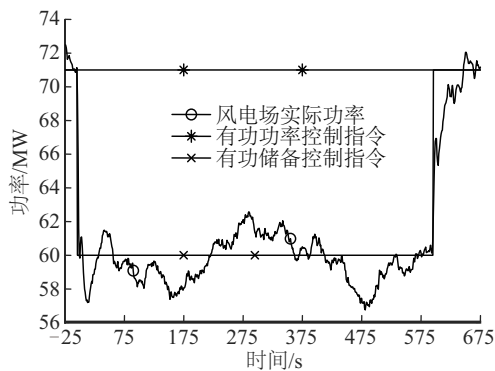
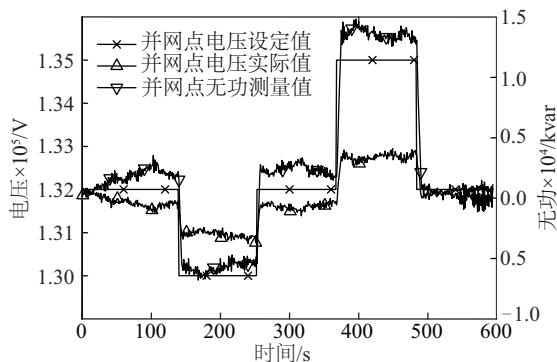


图7 有功预留控制模式的控制效果

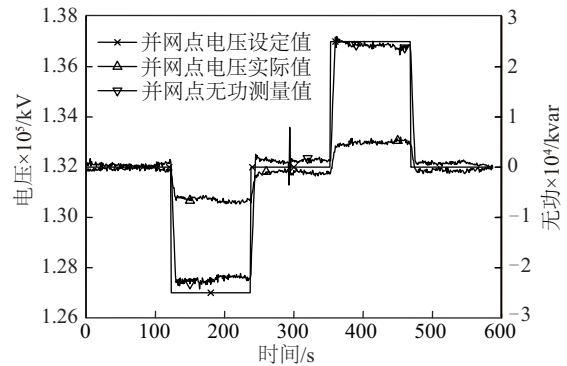
Fig. 7 Performance of active power reservation control

“○”标的曲线为在本文的功率控制方法下,风电场实际有功出力情况。风电场有功功率约 70 MW,在 0 时刻开启 15% 的有功储备控制,风电场有功功率在能量管理系统的控制下,迅速下降到 60 MW 附近。

图 8 为风电场电压-无功下垂特性控制的实测曲线,下垂特性参数分别设定为 4% 和 8%。其中,带“×”标的曲线为风电场并网点电压的设定值,带“△”标的曲线为风电场并网点的实测电压,带“▽”标的曲线为风电场并网点实际无功的测量值。从



a. 下垂特性参数设定为 4%



b. 下垂特性参数设定为 8%

图8 电压-无功下垂特性控制

Fig. 8 Voltage control of 4% and 8% droop

风电场现场实测功率出力情况可看出,在风能明显的波动区间内,本文所提出的方法通过滚动优化控制能有效控制风电场有功功率的连续波动。功率控制精度小于风电场容量的 0.3%,优于南非并网网则 0.5%的技术要求。

5 结 论

风电的大规模快速发展需要与之相适应的风电场功率控制方法,现有的控制方法尚无法有效应对因并网点及场内电压波动和风电机组控制系统频繁动作的问题。本文提出的结合超短期风功率预测的风电场功率分级控制方法,以风电场总的无功出力满足导则要求为约束条件,以风电机组电压稳定性为优化目标,保证风电机组的稳态运行。基于风电功率预测信息风电场功率滚动控制方法,与现有主要方法进行对比,可在提升风电机组稳定性的同时提高有功控制精度,保障南非风电项目的并网一致性并顺利通过南非电网的测试验证。

[参考文献]

- [1] 汤 奕,王 琦,陈 宁,等.采用功率预测信息的风电场有功优化控制方法[J].中国电机工程学报, 2012, 32(34): 1—7.
- [1] Tang Yi, Wang Qi, Chen Ning, et al. An optimal active power control method of wind farm based on wind power forecasting information [J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(34): 1—7.
- [2] 薛禹胜,郁 琛,赵俊华,等.关于短期及超短期风电功率预测的评述[J].电力系统自动化, 2015, 39 (6): 141—151.

- [2] Xue Yusheng, Yu Chen, Zhao Junhua, et al. A review onshore-term and ultra-short-term wind power prediction [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2015, 39(6): 141—151.
- [3] 张伯明, 吴文传, 郑太一, 等. 消纳大规模风电的多时间尺度协调的有功调度系统设计[J]. *电力系统自动化*, 2011, 35(1): 1—6.
- [3] Zhang Boming, Wu Wenchuan, Zheng Taiyi, et al. Design of a multi-time scale coordinated active power is patching system for accommodating large scale wind power penetration[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2011, 35(1): 1—6.
- [4] 行 舟, 陈永华, 陈振寰, 等. 大型集群风电有功智能控制系统控制策略: (一)风电场之间的协调控制[J]. *电力系统自动化*, 2011, 35(20): 20—23.
- [4] Xing Zhou, Chen Yonghua, Chen Zhenhuan, et al. A control strategy of active power intelligent control system for large cluster of wind farms part one coordination control for wind farms[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2011, 35(20): 20—23.
- [5] 符 杨, 潘翔龙, 黄玲玲. 考虑双馈机组无功调节能力的海上风电场无功优化[J]. *电网技术*, 2014, 38(8): 2169—2174.
- [5] Fu Yang, Pan Xianglong, Huang Lingling. Reactive power optimization for offshore wind farm considering reactive power regulation capability of doubly-fed induction generators [J]. *Power System Technology*, 2014, 38(8): 2169—2174.
- [6] 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.
- [6] Zou Jianxiao, Li Dan, Zheng Gang, et al. An active power control scheme for wind farms based on state classification algorithm[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2011, 35(24): 28—32.

ROLLING SMOOTHING CONTROL WITH ACTIVE POWER RESERVATION FOR WIND FARMS IN SOUTH AFRICAN

Zhang Wenjian¹, Chu Jingchun², Yuan Ling², Pan Lei², Pan Haining²

(1. *State Energy Investment Cooperation Ltd., Beijing 100034, China;*

2. *State Key Laboratory of Wind Power Equipment and Control (Guodian United Power Technology Co., Ltd.), Beijing 100039, China)*

Abstract: Because of the complex topology of large wind farms, the problem of voltage stability is prominent, which affects the tracking accuracy of dispatching instructions. In this paper, the active and reactive power command tracking of wind farm is taken as the control objective, the design limit and terminal voltage are taken as constraints, and a power control method considering the voltage stability in wind farm under the active power reservation mode is proposed. Combining with ultra-short-term wind power prediction, the high-precision rolling control of wind power generation is realized. The control strategy has been successfully applied to 245 MW large-scale wind power project in South Africa. The on-site test results showed that it effectively reduces the power fluctuation at POC (point of connection) and improves the voltage stability of the wind farm. It guaranteed the wind power project pass the on-side test of Eskom and enter the stage of commercial operation successfully.

Keywords: wind farms; voltage stability; power control; energy management