

# 基于分层MPC的风电场电压协调控制策略研究

王海军,王磊

(内蒙古能源发电投资集团有限公司  
电力工程技术研究院,内蒙古 呼和浩特 010060)

**摘要:**针对弱连接并网风电场电压稳定性易受风功率波动影响,提出了一种基于分层模型预测控制(MPC)的风电场电压协调控制策略。首先,建立自适应调节层,根据风电场无功补偿能力以及有功预测信息对并网点电压进行预测,实现对并网点电压的自适应调整。其次,建立无功分配层,通过计算风电机组在无功补偿中所需要的无功容量,根据不同风电机组的无功裕度对其无功出力进行分配。最后,根据跟踪控制层的反馈信息对电压控制的误差进行修正,从而达到对弱连接并网风电场无功电压的有效控制。仿真结果表明:提出的无功电压控制策略实现了对无功输出的自适应调整,并可有效地解决风电场存在的无功缺额问题;保证了在多种情况下的风电场并网电压控制的稳定性;通过分层MPC,各层内不同时间级的预测信息可被高效利用,各层间不同时间尺度的控制亦可得到有效协调。

**关键词:**风电场;模型预测控制;无功电压控制;自适应调整

**中图分类号:**TM351 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqcd22049

## Research on Voltage Coordination Control Strategy of Wind Farm Based on Hierarchical MPC

WANG Haijun, WANG Lei

(Electric Engineering Technology Research Institute of Inner Mongolia Energy Power  
Investment Group Co., Ltd., Hohhot 010060, Nei Monggol, China)

**Abstract:** Aiming at the problem that the voltage stability of weakly connected grid-connected wind farms is susceptible to wind power fluctuations, a hierarchical model predictive control (MPC) based coordinated control strategy for wind farm voltage was proposed. First, an adaptive adjustment layer was established to predict the grid-connected point voltage based on the wind farm's reactive power compensation capability and active power prediction information, and to achieve adaptive adjustment of the grid-connected point voltage. Secondly, a reactive power distribution layer was established, through calculating the reactive power capacity required by the wind turbine in reactive power compensation, its reactive power output according to the reactive power margin of different wind turbines was distributed. Finally, the voltage control error was corrected according to the feedback information of the tracking control layer, so as to achieve effective control of the reactive voltage of the weakly connected grid-connected wind farm. The simulation results show that the proposed reactive voltage control strategy realizes the adaptive adjustment of the reactive power output, and can effectively solve the problem of reactive power shortage in the wind farm. It guarantees the grid-connected voltage control of the wind farm in various situations stability of layers. Through hierarchical MPC, the prediction information at different time levels in each layer can be efficiently used, and the control of different time scales between each layer can also be effectively coordinated.

**Key words:** wind farm; model predictive control(MPC); reactive voltage control; adaptive adjustment

我国的风力资源多分布在新疆及沿海等边缘区域,与电网负荷中心距离较远,由于一般的风电场都是由末端并入电网,使得风电场与电力系统之间的连接具有弱连接性<sup>[1-2]</sup>。弱连接性将

使得风电场中的电压调解极易受到电力系统或风电场侧功率波动的影响<sup>[3]</sup>。

当前,虽然具备动态无功补偿功能的双馈风力机在风电场电压控制中能起到一定的无功调

**基金项目:**内蒙古自治区科技厅项目(JJKH20190976KJ)

**作者简介:**王海军(1975—),男,硕士,高级工程师,Email:wanghaijun75@163.com

节作用,但是随着越来越多无功补偿设备的增加,无功电压协调控制技术所面临的要求正变得越来越高<sup>[4]</sup>。针对风电场内多个无功补偿设备协同作用下的无功电压协调控制,国内外众多专家学者进行了大量研究<sup>[5]</sup>。然而其中大部分研究并没有考虑电压调节过程中会对未来状态产生影响而导致的电压滞后控制问题<sup>[6]</sup>。文献[7]采用模型预测控制(MPC),以当前系统的运行状态为基础,预测系统未来运行状态,对当前以及未来的状态进行综合控制,有效避免了电压的控制滞后问题。文献[8]提出一种基于MPC的含分布式光伏配电网有功功率-无功功率协调控制方法。文献[9]对与电网弱连接条件下的风电场并网点的电压控制进行了研究,其通过MPC有效调节了并网点的电压。然而,由于风电场的电压等级通常低于并网电压,当电压较低时,电阻/电抗( $R/X$ )较大,此时有功和无功均会影响并网点电压<sup>[10]</sup>。为了解决风电场电压控制中的有功影响,文献[11]使用MPC对风电场中的双馈风力机、静止无功发生器等设备进行了无功电压控制协调。通过上述研究,在风电场电压控制中,MPC已经得到了有效的应用。

然而,当前在MPC电压调节中仍存在无功功率不足,导致MPC电压协调控制失效的问题,且缺乏对有功功率预测信息源和方法的详细信息研究<sup>[12-13]</sup>。此外,风电场中多个机组之间无功功率的等比例分配将导致其他机组的无功调节能力无法充分发挥<sup>[14]</sup>。因此,为解决上述问题,在MPC理论中引入了垂直分层思想,提出了一种基于垂直分层和MPC的风电场无功电压控制策略。首先,通过对有功预测信息的充分利用,预测电压趋势和无功变化,实现对无功输出的自适应调整,解决风电场无功缺额的问题;同时,通过对风电场风机无功补偿的充分利用,为静态无功发生器预留了更多的无功储备。最后,通过仿真实验验证了所提电压控制方法的有效性。

### 1 分层MPC协调控制架构

本次研究在时间尺度上对有功预测进行了细化,并将垂直分层思维与MPC相结合。一方面在分段时间尺度内,将MPC用于滚动优化,通过搜索多个时间段内的局部最优值来获得全局最优值。另一方面,使用分层控制结构来减少不同时间尺度的预测误差。图1为分层MPC控制结

构框图,该结构包括并网自适应调节层、无功协调分配层以及跟踪控制层。其中, $U_{PCC}^{ref}$ 为上级控制中心向风电场下达并网点的参考电压指令; $U_{PCC}$ 为并网点电压实际值; $P_{pre}$ 为有功预测输出值; $U_{CB}$ 为汇集母线的电压实际值; $P_{max}$ 为风电场输出有功的最大值; $P_{wi}^{ref}$ 为*i*风机有功输出参考指令; $Q_{wi}^{ref}$ 为*i*风机无功输出参考指令; $Q_s$ 为静态无功补偿器的无功输出; $P$ 为风电场有功实际输出值; $Q$ 为风电场无功实际输出值。

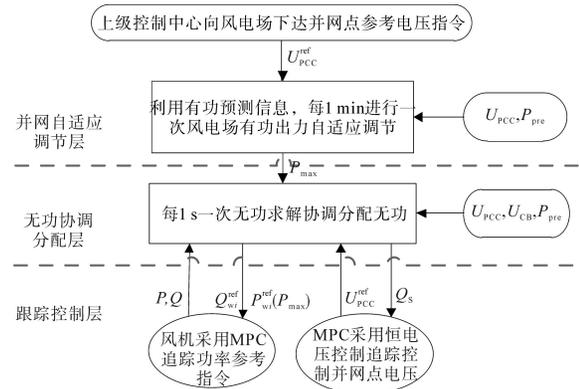


图1 分层MPC控制结构

Fig.1 Hierarchical MPC control structure

根据图1,MPC由上而下分成三层,每层MPC均通过超前控制、滚动优化的方式来实现不同时间级、不同层之间的协同控制,最终实现风电场无功电压控制的最优效果。

## 2 分层MPC的策略实现

### 2.1 灵敏度系数

由于风电场的电压较低,电阻/电抗( $R/X$ )较大,所以采用分析方法来计算灵敏度系数。假设风电系统的节点数为 $N$ ,其中平衡节点为节点1,其电压幅值 $U_1$ 恒等于 $U_{s1}$ ,其他节点为PQ节点,可采用下式所示的导纳矩阵来描述电流 $I_i$ 与电压 $U_i$ 之间的关系<sup>[15]</sup>:

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 \\ Y_{21} & Y_{22} & \dots & Y_{2i} & \dots & Y_{2N} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ Y_{i1} & Y_{i2} & \dots & Y_{ii} & \dots & Y_{iN} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ Y_{N1} & Y_{N2} & \dots & Y_{Ni} & \dots & Y_{NN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ \vdots \\ U_i \\ \vdots \\ U_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_{s1} \\ I_2 \\ \vdots \\ I_i \\ \vdots \\ I_N \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: $Y$ 为PQ节点中对应节点的互导纳; $i$ 为整数, $i \in [2, N]$ 。

对式(1)矩阵进行转置,得到 $U_i$ 和 $I_i$ 的阻抗矩阵如下式所示:

$$\begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ \vdots \\ U_i \\ \vdots \\ U_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 \\ \gamma_{21} & Z_{22} & \dots & Z_{2i} & \dots & Z_{2N} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \gamma_{i1} & Z_{i2} & \dots & Z_{ii} & \dots & Z_{iN} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \gamma_{N1} & Z_{N2} & \dots & Z_{Ni} & \dots & Z_{NN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{s1} \\ I_2 \\ \vdots \\ I_i \\ \vdots \\ I_N \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中:  $\gamma$  为经过转置运算后得到的导纳矩阵系数;  $Z$  为  $PQ$  对应节点的互阻抗。

若式(2)中除了  $k$  节点,其他节点的电流均为 0,则节点  $j$  的电压  $U_j$  如下式所示:

$$\gamma_{j1}U_{s1} + Z_{jk}I_k = U_j \quad k, j = 2, 3, \dots, N \quad (3)$$

其中,  $I_k$  为  $k$  节点电流,其值可通过对应节点  $U_k$ ,  $Q_k, P_k$  求解得到:

$$I_k = \frac{P_k - jQ_k}{U_k^{re} - jU_k^{im}} \quad (4)$$

式中:  $U_k^{re}$  为  $k$  节点电压实部;  $U_k^{im}$  为  $k$  节点电压虚部。

将  $U_{yj} = \gamma_{j1}U_{s1}$  代入式(3)可得到:

$$\begin{aligned} (U_{yj}^{re} + jU_{yj}^{im})(U_k^{re} - jU_k^{im}) + (R_{jk} + jX_{jk}) \cdot \\ (P_k - jQ_k) = (U_{yj}^{re} + jU_{yj}^{im})(U_k^{re} - jU_k^{im}) \end{aligned} \quad (5)$$

其中

$$Z_{jk} = R_{jk} + jX_{jk}$$

将式(5)展开,并分别求取  $U_j^{re}$  对  $P_k, Q_k$  的偏导数以及  $U_j^{im}$  对  $P_k, Q_k$  的偏导数。而后根据  $U_j^2 = (U_j^{re})^2 + (U_j^{im})^2$  可以得到节点  $k$  注入功率与节点  $j$  电压变化两者之间的灵敏度系数,如下式所示:

$$\frac{\partial U_j}{\partial P_k} = \frac{1}{U_j} \left[ U_j^{re} \left( \frac{\partial U_j^{re}}{\partial P_k} \right) + U_j^{im} \left( \frac{\partial U_j^{im}}{\partial P_k} \right) \right] \quad (6)$$

$$\frac{\partial U_j}{\partial Q_k} = \frac{1}{U_j} \left[ U_j^{re} \left( \frac{\partial U_j^{re}}{\partial Q_k} \right) + U_j^{im} \left( \frac{\partial U_j^{im}}{\partial Q_k} \right) \right] \quad (7)$$

式中:  $\partial U_j / \partial P_k$  为有功电压灵敏度系数;  $\partial U_j / \partial Q_k$  为无功电压灵敏度系数。

## 2.2 并网自适应调节层

在风电场与电网系统的并网处,风电场功率波动容易对并网处电压产生影响,将电压偏差  $\Delta U$  和有功变化  $\Delta P$  以及无功变化  $\Delta Q$  之间的关系定义如下:

$$\Delta U = \frac{\partial U_{PCC}}{\partial P} \Delta P + \frac{\partial U_{PCC}}{\partial Q} \Delta Q \quad (8)$$

式中:  $\partial U_{PCC} / \partial P, \partial U_{PCC} / \partial Q$  分别为风电场与电网并网处的有功和无功电压灵敏度系数。

为实现电压的超前控制,在收到上级控制中心下发的参考电压指令后,需要根据有功功率预测值对并网点的调压极限进行预测。

首先,根据式(8)可得到电压偏差与有功变

化之间的关系  $\Delta U_p = (\partial U_{PCC} / \partial P) \Delta P$ ,再根据未来 1 min 的有功预测以及当前时刻的并网点电压得到未来 1 min 的电压预测值变化轨迹。其次,将电压预测值变化曲线与风电场调压能力相结合以获得并网点极限调压曲线。而后根据极限调压曲线和电压调度指令对风电场有功输出极限曲线进行确定。图 2 为风电场并网点电压自适应调节过程。

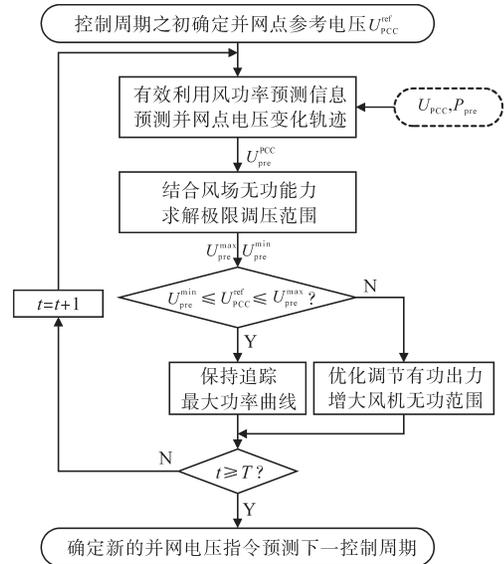


图 2 风电场并网点电压自适应调节

Fig.2 Wind farm grid connection point voltage adaptive adjustment

图 2 中,  $U_{pre}^{min}$  和  $U_{pre}^{max}$  分别为并网点电压调节下限和上限;  $U_{pre}^{PCC}$  为并网点电压预测值;  $T$  为风电场对并网处下达的参考电压指令的更新周期;  $U_{PCC}^{ref}$  为风电场并网点的参考电压指令。如果  $U_{PCC}^{ref}$  满足  $U_{pre}^{min} \leq U_{PCC}^{ref} \leq U_{pre}^{max}$ , 则表明在电压控制周期内,风机可以实现最大功率运行;如果  $U_{PCC}^{ref}$  不在电压极限上、下限范围内,则表明风电场无功调节存在缺额。

如果存在无功缺额,则需要在控制调节后的电压与并网点电压调节指令  $U_{PCC}^{ref}$  之间偏差最小的前提下,确定有功预测为最大时  $P_{max}^{pre}$  对有功输出功率的调整量。此时电压最小偏差目标函数为

$$\min F_1 = \|\Delta U_{pre}\|^2 \quad (9)$$

式中:  $\Delta U_{pre}$  为调压下限或者上限两者的偏差值;  $U_{PCC}^{ref}$  为参考电压指令。

根据并网点电压预测值  $U_{pre}^{PCC}$  的不同来确定取调压上限还是调压下限。若  $U_{pre}^{PCC} > U_{PCC}^{ref}$ , 则  $U_{pre}^{min} > U_{PCC}^{ref}$ , 此时应当保证电压调节的下限与参考电压之间的偏差在控制目标内。否则,若  $U_{pre}^{PCC} < U_{PCC}^{ref}$  则  $U_{pre}^{max} < U_{PCC}^{ref}$ , 那么应该保证电压调节

的上限与参考电压之间的偏差在控制目标内。

根据风电场有功功率预测最大值  $P_{\max}^{\text{pre}}$  以及电压调节上、下限,得到的风电场无功输出上限和下限值如下式所示:

$$\begin{cases} Q_{\max}^{\text{pre}} = f_Q^{\max}(P_{\max}^{\text{pre}}, U_{\text{pre}}^{\text{PCC}}) \\ Q_{\min}^{\text{pre}} = f_Q^{\min}(P_{\max}^{\text{pre}}, U_{\text{pre}}^{\text{PCC}}) \end{cases} \quad (10)$$

有功功率波动导致的无功输出上限变化为

$$\frac{\partial f_Q^{\max}}{\partial P_{\max}^{\text{pre}}} = \frac{f_Q^{\max}(P_{\max}^{\text{pre}} + \Delta P, U_{\text{pre}}^{\text{PCC}}) - f_Q^{\max}(P_{\max}^{\text{pre}}, U_{\text{pre}}^{\text{PCC}})}{\Delta P} \quad (11)$$

同理,可以得到有功功率波动导致的无功输出下限变化  $\partial f_Q^{\min}/\partial P_{\max}^{\text{pre}}$  及电压波动引起的无功输出上限变化  $\partial f_Q^{\max}/\partial U_{\text{pre}}^{\text{PCC}}$ 、下限变化  $\partial f_Q^{\min}/\partial U_{\text{pre}}^{\text{PCC}}$ 。

将风电场无功调节能力与并网点预测电压  $U_{\text{pre}}^{\text{PCC}}$  叠加,可以得到风电场极限电压调节的上限与下限。依据预测最大功率,在无功缺额的情况下对有功进行调节,调节量为  $\Delta P_{\text{need}}$ ,则并网点的预测电压的变化量可以表示为  $\Delta U_{\text{pre}}^{\text{PCC}} = (\partial U_{\text{PCC}}/\partial P) \cdot \Delta P_{\text{need}}$ ,此时极限调压上限与电压预测值偏差如下式所示:

$$\Delta U_{\text{pre}}^{\max} = U_{\text{pre}}^{\max} + \Delta U_{\text{pre}}^{\text{PCC}} + \frac{\partial U_{\text{PCC}}}{\partial Q} \frac{\partial f_Q^{\max}}{\partial P_{\max}^{\text{pre}}} \Delta P_{\text{need}} + \frac{\partial U_{\text{PCC}}}{\partial Q} \frac{\partial f_Q^{\max}}{\partial P_{\text{pre}}^{\text{PCC}}} \Delta U_{\text{pre}}^{\text{PCC}} - U_{\text{PCC}}^{\text{ref}} \quad (12)$$

此时极限调压下限与电压预测值的偏差  $\Delta U_{\text{pre}}^{\min}$  表示如下:

$$\Delta U_{\text{pre}}^{\min} = U_{\text{pre}}^{\min} + \Delta U_{\text{pre}}^{\text{PCC}} + \frac{\partial U_{\text{PCC}}}{\partial Q} \frac{\partial f_Q^{\min}}{\partial P_{\min}^{\text{pre}}} \Delta P_{\text{need}} + \frac{\partial U_{\text{PCC}}}{\partial Q} \frac{\partial f_Q^{\min}}{\partial P_{\text{pre}}^{\text{PCC}}} \Delta U_{\text{pre}}^{\text{PCC}} - U_{\text{PCC}}^{\text{ref}} \quad (13)$$

由此求解目标函数式(9),可以得到  $P_{\max}^{\text{pre}}$  处需调节的有功输出量  $\Delta P_{\text{need}}$ ,进一步计算出在此次的控制周期内需要调节的有功功率输出最大值为  $P_{\max} = P_{\max}^{\text{pre}} + \Delta P_{\text{need}}$ 。

## 2.3 无功协调分配层

### 2.3.1 目标函数与预测模型

在无功协调分配层,首先需要确定控制目标。对于风电场电压调节来说,控制目标主要有两个方面:一为并网点电压与参考电压指令之间的偏差最小化;二为静态无功发生器的无功储备最大化。由此,设定目标函数如下:

$$\min F_2 = \sum_{k=1}^h [\|\Delta U_{\text{PCC}}(k+h|k)\|^2 W_{\text{PCC}} + \|\Delta U_{\text{CB}}(k+h|k)\|^2 W_{\text{CB}} + \|\Delta Q_s(k+h|k)\|^2 W_s] \quad (14)$$

式中:  $\Delta U_{\text{PCC}}$  为并网点电压与参考电压指令的偏差值;  $\Delta U_{\text{CB}}$  为汇集母线电压与参考电压指令的偏差值;  $\Delta Q_s$  为静态无功发生器与对应无功输出参考值的偏差;  $W_{\text{PCC}}$  为  $\Delta U_{\text{PCC}}$  的权重系数;  $W_{\text{CB}}$  为  $\Delta U_{\text{CB}}$  的权重系数;  $W_s$  为  $\Delta Q_s$  的权重系数;  $h$  为预测的时间尺度。

则  $k$  时刻并网点电压与参考电压之间的偏差如下式所示:

$$\Delta U_{\text{PCC}}(k) = U_{\text{PCC}} + \left(\frac{\partial U_{\text{PCC}}}{\partial P}\right) \Delta P(k) + \left(\frac{\partial U_{\text{PCC}}}{\partial Q}\right) \Delta Q(k) - U_{\text{PCC}}^{\text{ref}} \quad (15)$$

$k$  时刻汇集母线电压与参考电压之间的偏差为

$$\Delta U_{\text{CB}}(k) = U_{\text{CB}} + \left(\frac{\partial U_{\text{CB}}}{\partial P}\right) \Delta P(k) + \left(\frac{\partial U_{\text{CB}}}{\partial Q}\right) \Delta Q(k) - U_{\text{CB}}^{\text{ref}} \quad (16)$$

式中:  $\Delta P(k)$ ,  $\Delta Q(k)$  分别为  $k$  时刻风电场的有功及无功变化量;  $\partial U_{\text{CB}}/\partial P$ ,  $\partial U_{\text{CB}}/\partial Q$  分别为汇集母线的有功及无功电压灵敏度系数;  $U_{\text{CB}}^{\text{ref}}$  为汇集母线参考电压。

设定并网点参考电压  $U_{\text{PCC}}^{\text{ref}}$  为控制目标,通过定电压控制模式使用静态无功发生器对并网点电压进行实时追踪与控制,避免因风电场功率波动而导致的电压不稳定现象。若静态无功发生器有足够的无功储备,则能够快速响应电压调节,保证并网点的电压的稳定。因此静态无功发生器的无功输出变化量为  $\Delta Q_s^{\text{change}}(k)$  与风电场有功变化  $\Delta P(k)$ 、无功变化  $\Delta Q(k)$  的关系可以通过灵敏度系数建立如下:

$$\frac{\partial U_{\text{PCC}}}{\partial Q_s} \Delta Q_s^{\text{change}}(k) + \frac{\partial U_{\text{PCC}}}{\partial P} \Delta P(k) + \frac{\partial U_{\text{PCC}}}{\partial Q} \Delta Q(k) \approx 0 \quad (17)$$

式中:  $\partial U_{\text{PCC}}/\partial Q_s$  为并网点电压对静态无功发生器的无功电压灵敏度系数。

对式(17)进行变换可得  $\Delta Q_s^{\text{change}}(k)$  如下式:

$$\Delta Q_s^{\text{change}}(k) = -\left(\frac{\partial U_{\text{PCC}}}{\partial Q} \frac{\partial Q_s}{\partial U_{\text{PCC}}}\right) \Delta Q(k) - \left(\frac{\partial U_{\text{PCC}}}{\partial P} \frac{\partial Q_s}{\partial U_{\text{PCC}}}\right) \Delta P(k) \quad (18)$$

为了保证静态无功发生器可以实现双向无功补偿,对其无功参考输出定义为

$$Q_s^{\text{ref}} = 0.5(Q_s^{\max} + Q_s^{\min}) \quad (19)$$

式中:  $Q_s^{\min}$ ,  $Q_s^{\max}$  分别为静态无功发生器的无功输

出最大值和最小值。

此时静态无功发生器的实际无功输出和无功参考输出的偏差量如下式所示:

$$\Delta Q_s(k) = Q_s + \Delta Q_s^{\text{change}}(k) - Q_s^{\text{ref}} \quad (20)$$

根据目标函数式(14),其应满足以下条件:

$$\begin{cases} U_{\text{PCC}}^{\min} \leq U_{\text{PCC}} \leq U_{\text{PCC}}^{\max} \\ U_{\text{CB}}^{\min} \leq U_{\text{CB}} \leq U_{\text{CB}}^{\max} \\ Q_s^{\min} \leq Q_s \leq Q_s^{\max} \\ Q^{\min} \leq Q \leq Q^{\max} \end{cases} \quad (21)$$

式中:  $U_{\text{PCC}}^{\max}$  为并网点电压最大值;  $U_{\text{PCC}}^{\min}$  为并网点电压最小值;  $U_{\text{CB}}^{\max}$  为汇集母线电压最大值;  $U_{\text{CB}}^{\min}$  为汇集母线电压最小值;  $Q_s^{\max}$  为风电场输出无功的最大值;  $Q_s^{\min}$  为风电场输出无功的最小值。

若  $\Delta Q(k)$  为输入,  $Q_s, U_{\text{CB}}, U_{\text{PCC}}$  为状态变量  $\mathbf{x}$ ,  $\Delta P(k)$  为  $k$  时刻对未来的有功预测信息, 则根据发电厂风力发电机组无功的动态响应过程建立输出与输入之间的状态空间预测模型如下式:

$$\begin{cases} \mathbf{x}(k+1) = \mathbf{A}\mathbf{x}(k) + \mathbf{B}\Delta Q(k) + \mathbf{D}\Delta P(k) \\ \mathbf{y}(k) = \mathbf{C}\mathbf{x}(k) \end{cases} \quad (22)$$

其中

$$\mathbf{x}(k) = \begin{bmatrix} [U_{\text{PCC}}(k) \ U_{\text{CB}}(k) \ Q_s(k)]^T \\ [U_{\text{PCC}}(k+1) \ U_{\text{CB}}(k+1) \ Q_s(k+1)]^T \\ \vdots \\ [U_{\text{PCC}}(k+H-1) \ U_{\text{CB}}(k+H-1) \ Q_s(k+H-1)]^T \end{bmatrix}_{H \times 1}$$

式中:  $\mathbf{x}(k)$  为状态变量序列, 即  $k, k+1, \dots, H$  个时刻的并网点电压、汇集母线电压、静态无功发生器输出无功三个状态变量的时间变化序列;  $\mathbf{A}, \mathbf{B}, \mathbf{D}$  为  $\mathbf{x}(k+1)$  的系数矩阵;  $\mathbf{C}$  为  $\mathbf{y}(k)$  的系数矩阵;  $\mathbf{y}(k)$  为  $k$  时刻的并网点电压、汇集母线电压、静态无功发生器无功输出的预测值。

### 2.3.2 无功协调分配策略

在风电场内, 不同机组之间的无功输出分配通常是等比例分配, 因此无法保证所有的风机机组都可以得到充分利用。故以无功裕度为基础, 提出新型风电机组实时无功分配策略, 如下式所示:

$$Q_{wi}^{\text{ref}} = \delta_i Q^{\text{ref}} \quad (23)$$

$$\begin{cases} \delta_i = \frac{Q_i^{\max}}{Q^{\max} - Q_i^{\max}} \\ \delta_i = \frac{Q_i^{\max}}{\sum_{i=1}^n (Q_i^{\max} - Q_i^{\max})} \\ Q^{\max} = \sum_{i=1}^n Q_i^{\max} \end{cases}$$

式中:  $Q^{\text{ref}}$  为风电场无功补偿需求值;  $\delta_i$  为  $i$  风机的

无功分配系数;  $Q_i^{\max}$  为  $i$  风机所能发出的最大无功值;  $n$  为风机的数量。

该新型无功分配策略可以对风电场风电机组的无功补偿性能进行充分的利用, 若风机的无功容量较大, 则会增加其无功分配系数, 而无功输出的增加, 则会导致无功容量小的风机的无功输出减少。

### 2.4 跟踪控制层

与PI控制器相比较, MPC控制器具有鲁棒性强、抗干扰能力强、响应速度快等优点。为了使风机能更好地对电压调节进行响应和控制, 需要在跟踪控制层通过状态空间模型的MPC进行无功电压追踪。首先, 基于风电场和电网的弱连接特点, 建立双馈风机状态空间模型, 根据双馈风机的特性, 设状态变量  $\mathbf{x}$  为  $[i_{sd}, i_{sq}, i_{rd}, i_{rq}]^T$ , 控制输入  $\mathbf{u}_r$  为  $[u_{rd}, u_{rq}]^T$ , 外部干扰为  $[u_{sd}, u_{sq}]^T$ 。此时离散化处理后的双馈风机状态空间模型如下式所示:

$$\begin{cases} \mathbf{x}(k+1) = \mathbf{A}_1 \mathbf{x}(k) + \mathbf{B}_1 \mathbf{u}_r(k) + \mathbf{D}_1 \mathbf{u}_s(k) \\ \mathbf{y}(k) = \mathbf{C}_1 \mathbf{x}(k) \end{cases} \quad (24)$$

式中:  $\mathbf{A}_1, \mathbf{B}_1, \mathbf{D}_1$  为  $\mathbf{x}(k+1)$  的系数矩阵;  $\mathbf{C}_1$  为  $\mathbf{y}(k)$  的系数矩阵。

在风机运行的过程中, 需要对其有功输出和无功输出进行追踪。对功率进行分解, 可以用转子  $d$  轴电流分量表示有功输出, 转子  $q$  轴电流分量表示无功输出, 在此基础上可以得到电流输出参考值  $y_{\text{ref}}$ 。为了实现对风力发电机组的控制, 建立控制目标函数, 使得风机输出变化幅度及控制动作变化幅度最小。控制目标函数如下式所示:

$$\min F_3 = \sum_{m=1}^M [\|y_p(k+mlk) - y_{\text{ref}}\|^2 W_y + \|\Delta u_r(k+mlk)\|^2 W_u] \quad (25)$$

式中:  $W_u$  为风机控制输入变化量权重系数;  $\Delta u_r(k+mlk)$  为控制输入变化量;  $W_y$  为风机控制输出权重系数;  $y_p(k+mlk)$  为第  $m$  步预测控制输出;  $M$  为预测时间段。

## 3 仿真结果与分析

为了对提出的无功电压调节控制方法的有效性进行验证, 使用PSCAD进行仿真验证。图3所示为风电场仿真模型, 其参数设置如下: 风电场额定容量  $33 \times 1.5$  MW, 共3台风机, 每台风机的额定容量为16.5 MW, 额定风速11 m/s。

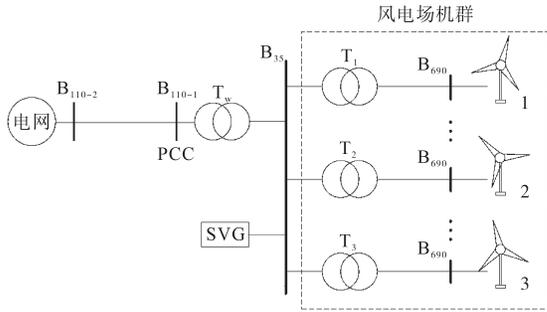


图3 风电场仿真模型

Fig.3 Wind farm simulation model

与当前其他风电场无功电压控制不同之处在于,分层MPC策略主要研究弱连接风电场中的无功电压控制。故电网电压对于风电场电压支撑较弱,设置并网处参考电压为1.0(标么值),电压波动为0.1(标么值)。同时,并网自适应调节层的自适应调节周期为1 min,无功协调分配层每0.2 s采集一次实时数据并将其输送至电压控制系统中,而后风电场电压控制系统每1 s输出优化后的不同风机的无功参考值。在跟踪控制层,MPC的控制周期为2 ms,设置仿真时间长度为20 s,从第3 s开始使用风电机组对无功电压进行调节控制。

在无功协调分配层,每次无功求解过程耗时小于0.1 s,同时,风电场内数据传输速度为ms级,故无功电压控制周期为s级,可以满足无功电压调节的性能要求。在此层的无功功率求解中,为了对风机和静态无功发生器的无功裕度进行对比分析,定义 $M_{Q_c}$ 为无功裕度指标如下:

$$M_{Q_c} = \begin{cases} \frac{Q_c^{\max} - Q_c}{Q_c^{\max}} & Q_c > 0 \\ \frac{Q_c^{\min} - Q_c}{Q_c^{\min}} & Q_c < 0 \end{cases} \quad (26)$$

其中,下标 $c$ 为1,2,3时,对应三台风机;若 $c=S$ ,则代表静态无功发生器。

### 3.1 风电场无功分配策略分析

为了对提出的风电场无功分配策略的有效性进行验证,选取无功等比例分配法进行差异对比。如表1所示,对三台风机输入不同的风速,其中1号风机输入风速10.8 m/s,2号风机输入风速9.0 m/s,3号风机输入风速7.0 m/s。当风电场并网点电压与参考电压不同时,并且静态无功发生器所有的无功裕度被使用完毕之后,对三台风机的输出无功进行记录。

表1 输入风速及对应无功范围

风机	风速/(m·s <sup>-1</sup> )	无功下限/Mvar	无功上限/Mvar
1	10.8	2.21	-2.69
2	9.0	13.19	-13.81
3	7.0	16.39	-17.01

表2为两种无功分配策略下的风机无功分配结果,根据表2两种方法的无功分配对比可知,3号风机的无功调节能力较强,有功出力较少,使用分层MPC的无功分配策略则3号风机分配的无功输出更大,由此可知,所提出的无功分配策略可以增加风电机组多余无功裕度的利用率,无功分配也更加合理,避免了1号风机无功裕度的过度饱和,并且可以增加3号风机的无功裕度的有效充分利用。

表2 两种方法下的风机输出无功对比

风机	无功输出/Mvar			裕度/%		
	分层MPC	等比例分配	变化量	分层MPC	等比例分配	变化量
1	0.985	1.697	-0.713	54.41	21.33	33.11
2	9.616	10.399	-0.781	27.25	21.33	5.89
3	14.398	12.901	1.497	12.19	21.33	-9.09

### 3.2 无功缺额情况下的仿真分析

为了对垂直分层MPC无功电压控制有效性的验证,在风电机组无功缺额情况下进行仿真,仿真结果如图4所示。

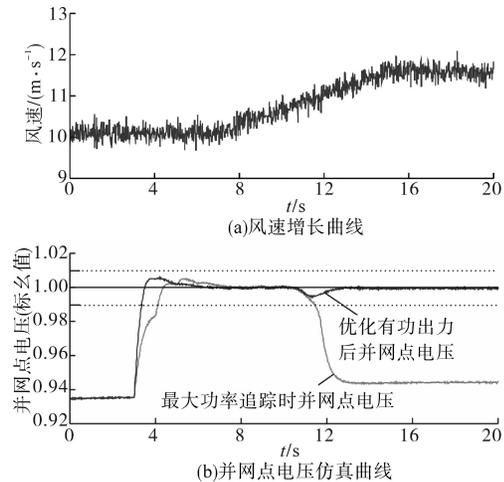


图4 风速增长曲线与并网点电压仿真结果

Fig.4 Simulation results of wind speed growth curve and grid connection point voltage

通过逐渐提升风机风速(见图4a),使得风机的有功出力逐渐增加直到饱和,对此状态下的无功电压控制结果进行分析。根据图4b可知,风机未开始无功补偿之前,仅仅依靠静态无功发生器

无法满足风电场对无功电压调节的需求。从3 s开始风电机组开始无功补偿,此时无功补偿裕度充裕,两种方法均可达到较好的效果。12 s之后,风电场出现无功不充裕的现象,电压出现越限现象,此时所提的电压控制方法对有功出力进行了调节,使得并网点电压保持在电压参考值附近,电压调节效果较好。

图5为风电场无功输出和SVG无功输出对比曲线图,其中,图5a中的虚线为无功输出参考值。

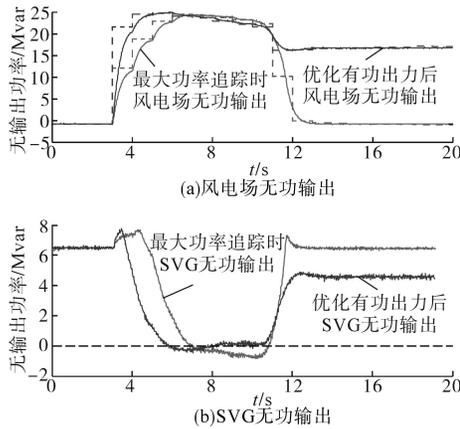


图5 风电场无功输出与SVG无功输出  
Fig.5 Wind farm reactive power output and SVG reactive power output

根据图5所示,所提出的无功电压控制方法可以为静态无功发生器预留出较多的动态无功储备。而12 s后,分层MPC控制策略通过对有功出力的有效调节,在保证较少的有功损失的前提下,提高了风电场的无功调节能力,使得风电场并网点电压保持稳定和较小的偏差,同时也为静态无功发生器预留了较多的动态无功储备。

为了对两种无功电压控制方法下静态无功发生器所剩无功裕度进行直观比较,将仿真过程按时间进行分段,包括3~7 s,7~11 s,11~20 s三个时间段,其中3~7 s是并网点控制电压恢复与无功快慢置换阶段,7~11 s是风电系统运行稳定阶段,11~20 s是无功缺额优化调整阶段。每个时间段内的平均裕度的计算是通过各个时间段内每0.2 s计算的无功裕度的平均值,结果如表3所示。从表3和图4b可以看出,在3~7 s时间段内,分层MPC的电压控制方法电压恢复速度更快,同时为静态无功发生器预留的无功储备多了26.33%。在7~11 s时间阶段内,两种控制方法预留的SVG无功裕度均较大,然而通过图5a发现,分层MPC控制方法所留SVG的无功裕度更大。在11~20 s时间段内,由于分层

MPC控制方法对有功输出进行了调节,使并网点电压保持稳定,同时由于避免了无功缺额的现象。

表3 SVG的无功裕度  
Tab.3 SVG reactive power margin

时段/s	平均无功裕度 MQS/%		差值/%
	优化有功出力	最大功率追踪	
3~7	70.92	44.59	26.33
7~11	97.84	92.88	4.96
11~20	44.81	21.22	23.59

### 3.3 风功率快速波动情况下的仿真分析

弱连接风电场容易受到风电场侧有功波动的影响,为验证风速快速波动情况下的控制效果设计了如图6a所示风速输入模式,并网点电压如图6b所示。从图6b中也可以看出,分层MPC的无功电压控制方法对于功率波动响应较快,对电压的调节较为敏捷,同时在9~13 s风功率波动过程中,分层MPC的无功电压控制方法能够有效地抑制并网点电压的波动。

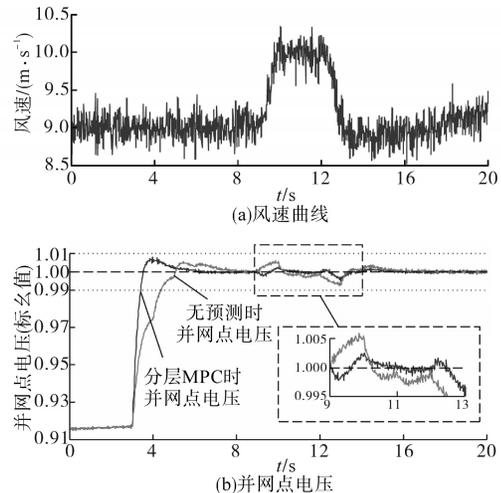


图6 快速波动风速曲线与并网点电压仿真结果  
Fig.6 Simulation results of fast fluctuating wind speed curve and grid connection point voltage

如图7所示为仿真中风电场域SVG无功输出情况。图7a中,虚线为无功输出的参考值,虽然图中显示两种方法对电压的控制趋势是相同的,但是在9~12 s过程中,分层MPC方法能够早于另一种控制方法先行进行控制。同时,根据图7b所示,分层MPC无功电压控制方法的SVG预留无功高于无功率预测的电控控制方法,这使得在后续风电电压调解时,分层MPC控制方法更具灵活性和有效性。

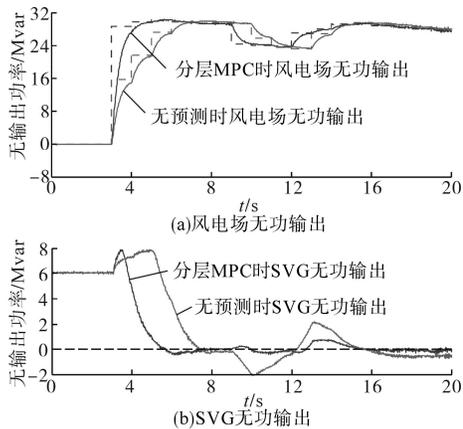


图7 风速快速波动时风电场无功输出与SVG无功输出

Fig.7 Wind farm reactive power output and SVG reactive power output when the wind speed fluctuates rapidly

综上所述,根据弱连接风电场并网 110 kV 电网仿真实验,所提出的基于垂直分层算法的 MPC 无功电压控制方法在没有电网电压支撑的状态下,可以有效消除风电场有功波动对电压的影响,同时保证静态无功发生器在风电场运行中的预留无功裕度,使其即使在风电场无功不足的情况下,也可以通过调整有功出力来控制并网点电压处在正常的水平之上。

## 4 结论

在与电网弱连接的双馈型风电场中,为解决风电场侧有功功率对无功电压控制的影响,提出了一种基于垂直分层思想的 MPC 无功电压控制策略,通过分析实验得出以下结论:

1)通过对有功预测信息的充分利用来预测电压趋势和无功变化,实现对无功输出的自适应调整,有效解决了风电场无功缺额的问题。

2)通过对风电场风机无功补偿能力的充分利用为静态无功发生器预留了更多的无功储备,使其更具灵活性。

3)通过仿真实验验证了分层 MPC 控制方法的有效性,保证了在多种情况下的风电场并网电压控制的稳定性。

分层 MPC 无功电压控制策略有效解决了风电场并网存在的弱连接性,后续将重点研究将所提出的分层 MPC 控制方法应用到实际风电场电压控制中,提高系统稳定性。

### 参考文献

[1] 李洋,常栋梁,何立柱,等.考虑动态补偿控制的风电场无功电压问题分析[J].智慧电力,2018,46(6):34-40.

Li Yang, Chang Dongliang, He Lizhu, *et al.* Analysis of wind farm reactive voltage considering dynamic compensation control [J]. Smart Power, 2018, 46(6): 34-40.

[2] Džafic I, Jabr R A, Halilouic E, *et al.* A sensitivity approach to model local voltage controllers in distribution networks[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(3): 1419-1428.

[3] 吴涛,刘立红,王岱岚.某风电场智能化远程集控系统的设计[J].中国电力,2018,51(4):161-167.

Wu Tao, Liu Lihong, Wang Dailan. Design of remote centralized intelligent monitoring system for wind farms[J]. Electric Power, 2018, 51(4): 161-167.

[4] 张忠,王建学.采用模型预测控制的微电网有功无功联合实时调度方法[J].中国电机工程学报,2016,36(24): 6743-6750.

Zhang Zhong, Wang Jianxue. An active and reactive power joint real-time dispatch approach for microgrid using model predictive control[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(24): 6743-6750.

[5] 崔杨,彭龙,仲悟之,等.双馈型风电场群无功分层协调控制策略[J].中国电机工程学报,2015,35(17):4300-4307.

Cui Yang, Peng Long, Zhong Wuzhi, *et al.* Coordination strategy of reactive power control on wind farms based doubly fed induction generator[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(17): 4300-4307.

[6] 王永杰,吴文传,张伯明,等.有功无功协调的主动配电网鲁棒电压控制[J].电力系统自动化,2016,40(9):29-34.

Wang Yongjie, Wu Wenchuan, Zhang Boming, *et al.* Active and reactive power coordinated robust optimization for active distribution networks[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(9): 29-34.

[7] 董雷,陈卉,蒲天骄,等.基于模型预测控制的主动配电网多时间尺度动态优化调度[J].中国电机工程学报,2016,36(17): 4609-4617.

Dong Lei, Chen Hui, Pu Tianjiao, *et al.* Multi-time scale dynamic optimal dispatch in active distribution network based on model predictive control[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(17): 4609-4617.

[8] 张颖,季宇,唐云峰.基于 MPC 含分布式光伏配电网有功功率-无功功率协调控制[J].电力系统自动化,2017,41(21): 140-146.

Zhang Ying, Ji Yu, Tang Yunfeng. Coordinated control of active and reactive power for distribution network with distributed photovoltaic based on model predictive control[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(21): 140-146.

[9] 崔杨,徐蒙福,唐耀华,等.基于集电系统无功灵敏度的双馈风电场无功控制策略[J].电网技术,2015,39(9):2418-2423.

Cui Yang, Xu Mengfu, Tang Yaohua, *et al.* Reactive control strategy of DFIG wind farm based on reactive sensitivity of collection system[J]. Power System Technology, 2015, 39(9): 2418-2423.

(下转第80页)

ments in the research of the car products[D]. Changchun: Jilin University, 2009.

[2] 万鸾飞,程克林,吴健,等.基于LabVIEW的电功率加载试验台测控系统[J].电气传动,2012,42(6):40-43.  
Wan Luanfei, Cheng Kelin, Wujian, *et al.* Electric power load test and control system based on LabVIEW[J]. Electric Drive, 2012, 42(6):40-43.

[3] 孙茂军.汽车机械变速器动力性能试验台的研究[D].武汉:武汉理工大学,2013.  
Sun Maojun. The research of transmission efficiency test bench of mechanical transmission[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2013.

[4] 熊迪.电封闭式FR机械变速器测试台架研究[D].武汉:武汉理工大学,2014.  
Xiong Di. Study on electrically enclosed test bench of FR mechanical transmission[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2014.

[5] 闻居博.传动试验台架负载电模拟技术研究[D].上海:上海交通大学,2011.  
Wen Jubo. Research on electrical dynamic load emulation for powertrain test bench[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2011.

[6] 伍庆龙,刘忠途,宗志坚.基于虚拟仪器的电动汽车动力平台测试系统[J].电气自动化,2010,32(6):69-72.  
Wu Qinglong, Liu Zhongtu, Zong Zhijian. Test system of electric vehicle dynamic performance based on virtual instrument[J]. Electrical Automation, 2010, 32(6):69-72.

[7] 朱靖,陈舒燕,余朝刚.基于LabVIEW的电动汽车驱动系统测试平台设计[J].化工自动化及仪表,2015,42(2):199-202.  
Zhu Jing, Chen Shuyan, Yu Chaogang. Test platform design for driving system of electric vehicles based on LabVIEW[J]. Control and Instruments in Chemical Industry, 2015, 42(2):199-202.

[8] 李秀娟.汽车电控单元柔性测试系统研究[D].徐州:中国矿业大学,2015.  
Li Xiujian. Research on flexible testing system for automotive electronic control unit[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2015.

[9] 窦赛,陈国顺,贾彪.柔性测试技术在复杂装备测试中的应用[J].现代电子技术,2011,34(9):141-144.  
Dou Sai, Chen Guoshun, Jia Biao. Application of flexible testing technology in complicated equipment test[J]. Modern Electronics Technique, 2011, 34(9):141-144.

收稿日期:2020-08-11  
修改稿日期:2020-08-25

~~~~~  
(上接第67页)

[10] 杨俊友,崔嘉,邢作霞,等.考虑风电功率预测的分散式风电场无功控制策略[J].电力系统自动化,2015,39(13):8-15.  
Yang Junyou, Cui Jia, Xing Zuoxia, *et al.* Reactive power control strategy for dispersed wind farm considering wind power forecasting[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(13):8-15.

[11] 邵联合,李兴国.风电场模型预测多时间尺度电压协调控制[J].电气传动,2018,48(4):41-48.  
Shao Lianhe, Li Xingguo. Model predictive multi time scale voltage coordinated control of wind farms[J]. Electric Drive, 2018, 48(4):41-48.

[12] 路亮,柳璐,程浩忠,等.风电场内部无功分配优化策略[J].电力系统及其自动化学报,2019,31(7):123-128.  
Lu Liang, Liu Lu, Cheng Haozhong, *et al.* Optimization strategy for reactive power allocation in wind farm[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2019, 31(7):123-128.

[13] Zhao H, Wu Q, Wang J, *et al.* Combined active and reactive power control of wind farms based on model predictive control [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2017, 32(3): 1177-1187.

[14] 刘军,赵婷,张彬彬.考虑功率调节能力的风电场有功功率分配研究[J].电气传动,2019,49(12):38-43.  
Liu Jun, Zhao Ting, Zhang Binbin. Research on active power allocation of wind farm considering power regulation ability[J]. Electric Drive, 2019, 49(12):38-43.

[15] Tang Z, Hill D, Liu T, *et al.* Hierarchical voltage control of weak sub-transmission networks with high penetration of wind power[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(1): 187-197.

收稿日期:2020-06-15  
修改稿日期:2020-06-23