

# 兼顾接入地区无功需求的风电场无功控制策略

朱凌志, 陈 宁, 王 伟

(国网电力科学研究院/南京南瑞集团公司, 江苏省南京市 210003)

**摘要:** 越来越多的风电并入电网后, 对接入地区的电压影响也越来越大, 为此, 系统要求风电场能够对接入地区提供电压/无功支撑。文中提出了一种兼顾风电接入地区电压/无功需求的风电场无功控制方法。该方法以接入变电站低压侧电压作为控制电压, 将风电场无功控制区分为正常控制区、异常控制区、紧急控制区和脱网控制区, 并给出 3 种控制模式, 即异常控制模式、紧急控制模式和故障控制模式。利用某一时段的控制电压平均值作为选择无功控制区的依据, 并综合相邻 2 个时段的平均控制电压差值和接入变电站与风电场之间的通信情况选择无功控制模式。实际系统案例分析结果表明: 所提出的方法能够合理调整风电场的输出无功功率, 在很少的控制周期内将控制电压调整到合格范围, 使一个测量周期内的平均电压合格, 有效地为风电接入地区提供无功支持。

**关键词:** 风电接入地区; 电压/无功需求; 风电场; 无功控制; 灵敏度

**中图分类号:** TM614; TM761

## 0 引言

社会可持续发展战略要求不断加大可再生清洁能源发电的利用, 风力发电作为技术最为成熟的可再生能源发电方式之一, 必将得到大力发展。为此, 风电接入对电力系统的影响<sup>[1-2]</sup>、风电机组并网运行的特性<sup>[3-4]</sup>以及风电机组在系统不同运行方式下的控制方式<sup>[5-6]</sup>越来越受到人们的关注。

早期并网型风电场主要采用恒速异步风力发电机, 在向电网输出有功的同时从电网吸收无功, 不具备电压控制能力, 且会引起区域电压降落<sup>[5]</sup>。在系统特殊运行方式下, 恒速风电机组的上述特性可能会加剧系统运行状态的恶化。随着风电并网容量的增加, 系统电压稳定问题将更加突出。文献[7]的研究表明在风电场母线装设静止无功补偿装置(SVC), 可改善恒速异步机风电场的暂态电压稳定性; 文献[8]提出了改善风电机组故障穿越能力的无功补偿技术。

随着风电技术的发展, 变速恒频双馈风电机组逐渐成为新建风电场的主流机型。这类风电机组能够实现变速恒频及输出有功、无功的解耦控制<sup>[5-6]</sup>, 可按系统运行方式要求及采用的控制策略吸收或发出无功, 因此可在一定程度上参与接入地区的电压

控制。文献[9]基于双馈风电机组模型给出了无功功率极限, 并提出双馈电机风电场对当地用户进行就地无功补偿的控制及分配策略。

由上述可知, 各国专家学者对风电场接入电网引起的电压稳定及控制问题已经做了大量研究工作, 并取得了一定的成果。然而由于种种原因, 国内风电场中的变速恒频风电机组通常以恒功率因数方式运行, 其快速灵活的无功调节能力并未得到充分利用。因此, 对于一个具有动态无功调节能力的大型风电场, 结合接入地区电网的电压波动情况, 如何对接入地区电网进行合理有效的无功补偿还需要进一步研究。针对国内风力发电应用的特点, 即大容量集群式风电场集中接入电网, 这一问题的研究可以为风电更好地配合接入地区电网运行提供有效的决策支持, 具有重要的意义。

本文从兼顾风电接入地区电压/无功需求的角度对上述问题进行了研究, 提出一种新的风电场对接入地区电网的无功控制方法, 该方法结合电网和风电场的运行要求对风电场的无功控制进行分区, 给出了相应的无功控制模式及选择方法。

## 1 本文方法的基本思想

本文提出的风电场无功控制框架见图 1。本文将风电场无功控制区进行划分, 给出 3 种不同的新型控制模式, 按具体情况进行选择。选择风电接入变电站的低压侧电压作为控制电压, 以风电场接入变电站为控制单元, 在风电场接入变电站增加相应

收稿日期: 2008-06-17; 修回日期: 2008-11-04。

国家“十一五”科技支撑计划资助项目(2008BAA14B04); 国家电网公司重点项目(风电场控制系统关键技术研究及装置开发)。

的风电无功控制处理模块,判断和选择风电场无功控制区和控制模式并向风电场发送调控执行指令;在风电场中也增加相应的控制模块,若由于某些原因造成风电场未收到相关的调控执行指令,风电场则根据出口母线电压信息进行自治无功控制。

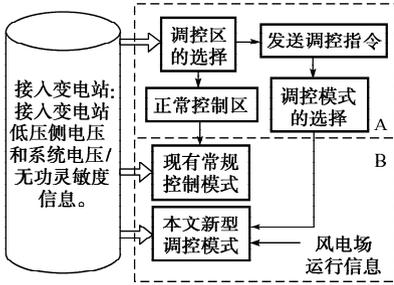


图1 风电场无功控制框架

Fig.1 Reactive power control structure of wind farm

当控制电压超出正常范围时,由变电站向区域电网内的风电场发送调控触发指令。设电压控制周期为  $T$ ,一个控制周期包括电压采样时间、风电机组、系统响应时间和风电机组调节时间,其中,每个控制周期应略长于上述时间之和。每个控制周期均按照图1所示的风电场无功控制框架,利用接入变电站的电压和灵敏度信息,结合实时运行信息对风电场的无功进行控制。风电场接收到调控触发指令之后,进入图1所示虚框A部分,即无功控制模块。由于电压时刻变化,为避免风电机组被频繁调控,求取一个控制周期内的电压平均值为:

$$V_i^{ave} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n V_{li}^{sam} \quad (1)$$

式中: $V_i^{ave}$ 为接入变电站在一个控制周期内的电压平均值; $V_{li}^{sam}$ 为接入变电站在一个电压采样周期内的第*i*次电压采样值; $n$ 为电压采样次数。

根据  $V_i^{ave}$  判断和选择风电场所处的控制区。进一步,根据相邻2个控制周期电压平均值的变化趋势判断和选择风电场的控制模式。之后,进入虚框B部分,风电场结合虚框A选择的控制模式和自身的运行限制进行控制。在一个控制周期内,接入变电站只向风电场发送一次调控指令。若控制周期结束,控制电压未恢复,则再次向风电场发送调控指令,如此周而复始,直至控制电压恢复或风电场的无功余量耗尽。需要注意的是,若控制电压恢复,仍须维持一个控制周期的无功控制,之后,将风电场的控制方式或输出无功功率逐步恢复到初始状态,以保证风电场具有足够的无功调节裕度。

考虑到风电场与接入变电站之间的通信可能会

出现故障,风电场无法接收来自接入变电站的调控执行指令,此时,风电场唯一可用的信息就是风电场出口变电站提供的风电场出口母线实时电压及风电场接入线路潮流信息。风电场内的无功控制模块可按照式(1)求取一个控制周期内的平均电压值  $V_w^{ave}$ ,若  $V_w^{ave}$  异常,在整定的延迟时间内没有收到接入变电站的相关信息和调控执行指令,则进行自治控制,以满足系统无功/电压需求。

## 2 无功控制区和控制模式的划分及选择

### 2.1 无功控制区的划分

结合接入点安全运行对电压的要求和风电场自身运行对电压的要求,根据  $V_i^{ave}$  和  $V_w^{ave}$  的数值大小将风电场的无功控制区分为正常控制区、异常控制区、紧急控制区和脱网控制区。若接入变电站与风电场之间通信正常,则有:

$$\text{控制区} \in \begin{cases} \text{正常} & V_i^{ave} \in [V_{II}^{nor}, V_{Ih}^{nor}] \\ \text{异常} & V_i^{ave} \in [V_{II}^{abn}, V_{II}^{nor}] \cup [V_{Ih}^{nor}, V_{Ih}^{abn}] \\ \text{紧急} & V_i^{ave} \in [V_{II}^{lim}, V_{II}^{abn}] \cup [V_{Ih}^{abn}, V_{Ih}^{lim}] \end{cases} \quad (2)$$

$$V_{II}^{lim} = V_w^{min} - \frac{PR + QX}{V_w^{min}} \quad (3)$$

$$V_{Ih}^{lim} = V_w^{max} - \frac{PR + QX}{V_w^{max}} \quad (4)$$

式中: $V_{Ih}^{nor}$ 和  $V_{II}^{nor}$ 分别为接入点变电站低压侧合格电压的上、下限; $V_{Ih}^{abn}$ 和  $V_{II}^{abn}$ 分别为接入点变电站低压侧异常电压的上、下限; $V_{Ih}^{lim}$ 和  $V_{II}^{lim}$ 分别为由风电场安全运行电压折算到接入点变电站低压侧电压的上、下限; $V_w^{max}$ 和  $V_w^{min}$ 分别为风电场安全运行电压的上、下限; $P$ 和  $Q$ 分别为接入线路上传输的有功功率和无功功率,风电场注入功率方向为正方向; $R$ 和  $X$ 分别为接入线路的电阻和电抗。

若接入变电站与风电场之间通信故障,则通过就地测控装置可以获取风电场出口母线电压等实时信息,若接入联络线参数已知,易得接入点的电压信息,故可将一个控制周期内风电场出口母线电压平均值折算为接入点变电站低压侧电压平均值:

$$V_i^{ave} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( V_{wi}^{sam} - \frac{PR + QX}{V_{wi}^{sam}} \right) \quad (5)$$

式中: $V_{wi}^{sam}$ 为风电场出口母线电压第*i*次采样值。

脱网控制区是指风电场在经过一段时间的故障穿越之后,控制电压仍未能及时恢复,则为了保护风电场内机组安全,风电场脱网运行。

### 2.2 无功控制模式定义及选择

定义3类新型的风电场无功控制模式:①异常

控制模式,主要针对接入变电站电压异常偏差相对较小或电压处于缓慢恢复过程的情况;②紧急控制模式,主要针对接入变电站电压偏离合格电压范围较大或电压进一步恶化的情况;③故障控制模式,主要针对接入变电站与风电场之间通信出现故障的情况。下面说明选择风电场无功控制模式的方法。

1)当判别出风电场处于正常控制区时,说明风电接入地区的无功能够较好地满足维持地区电压稳定的需求。此时,风电场仍采用现有常规控制模式,以保证其留有足够的无功裕度。

2)当风电接入地区的无功容量不足或无功响应较慢引起控制电压出现偏差而使风电场处于异常控制区时,风电场应根据接入地区的电压/无功需求调整输出无功功率,以尽可能地给予系统支持。风电场根据相邻2个控制周期内控制电压的平均值选择相应的控制模式。具体方法如下。

定义相邻2个控制周期的控制电压变化量为:

$$\Delta V_{1,k+1}^{\text{ave}} = V_{1,k+1}^{\text{ave}} - V_{1,k}^{\text{ave}} \quad (6)$$

式中: $\Delta V_{1,k+1}^{\text{ave}}$ 为第 $k+1$ 个控制周期的控制电压变化量; $V_{1,k+1}^{\text{ave}}$ 为第 $k+1$ 个控制周期的控制电压平均值; $V_{1,k}^{\text{ave}}$ 为第 $k$ 个控制周期的控制电压平均值。

若控制电压偏高时 $\Delta V_{1,k+1}^{\text{ave}} < \Delta V_{1,k}^{\text{ave}} < 0$ ,或系统频率偏低时 $\Delta V_{1,k+1}^{\text{ave}} > \Delta V_{1,k}^{\text{ave}} > 0$ ,表明控制电压恢复速率加快,由于当网络结构不变和相邻2次控制后运行状态变化不大时,每次动作所产生的影响比较接近,故可认为是接入地区的无功补偿或主电网提供无功支持等措施参与了无功调节所致,此时,风电机组保持原无功功率值运行;若控制电压偏高时 $0 > \Delta V_{1,k+1}^{\text{ave}} > \Delta V_{1,k}^{\text{ave}}$ ,或电压偏低时 $0 < \Delta V_{1,k+1}^{\text{ave}} < \Delta V_{1,k}^{\text{ave}}$ ,表明控制电压仍在恢复,但恢复速率减慢,此时,风电场采用异常控制模式;若控制电压偏高时 $\Delta V_{1,k+1}^{\text{ave}} > 0$ ,或控制电压偏低时 $\Delta V_{1,k+1}^{\text{ave}} < 0$ ,表明控制电压进一步恶化,此时,风电场采用紧急控制模式。

3)风电场处于紧急控制区时,为了系统安全,风电场按紧急控制模式调整输出无功功率,尽最大可能地支持系统运行。若控制电压得到一定程度的恢复,使风电场进入正常控制区或异常控制区,则依照方法1或方法2执行;否则,若控制电压进一步恶化,则进入脱网控制区,风电场脱网运行。

4)若接入变电站与风电场之间通信故障,使风电场无法接收来自接入变电站的调控执行指令时,风电场直接根据风电场出口母线电压折算得到的控制电压选择故障控制模式进行控制。

### 3 具体控制方法

#### 3.1 异常和紧急控制模式

##### 3.1.1 实现方法

若接入变电站与风电场之间通信正常,由接入变电站可以掌握主电网注入的无功功率和接入地区各连接线路传送的无功功率信息,则相邻2个控制周期的无功控制完成后,主电网向接入地区注入的无功功率变化量为:

$$\Delta Q_{m,k+1} = Q_{m,k+1} - Q_{m,k} \quad (7)$$

式中: $Q_{m,k+1}$ 和 $Q_{m,k}$ 分别为第 $k+1$ 和第 $k$ 个控制周期的无功控制完成后,主电网向接入地区注入的无功功率,主电网向接入地区注入无功功率为正。

需要说明的是,在第1个控制周期, $\Delta Q_{m,k+1} = 0$ 。

另一方面,灵敏度指标在电压稳定分析中得到了广泛的应用<sup>[10]</sup>。通过提取相应的电压/无功灵敏度信息,能够较为准确地确定接入地区的无功需求。在文献<sup>[10]</sup>的基础上进一步提出了“部分雅可比矩阵”的概念,只将研究区域的发电机节点和负荷节点以及可能的无功补偿安装地点视为注入节点,系统中所有其他节点(包括其他区域的负荷节点)均视为联络节点,对雅可比矩阵进一步降阶,求得包含所研究节点功率/电压灵敏度信息的雅可比矩阵。具体求解方法见附录A。

第 $k+1$ 个控制周期的控制电压平均值越限为:

$$\Delta V_{k+1} = V_{k+1}^{\text{ave}} - V_0 \quad (8)$$

式中: $V_0$ 为电压参考值,取1。

忽略有功对电压的影响,则可求得第 $k+1$ 个控制周期的无功需求量为:

$$\Delta Q_{k+1} = \Delta V_{k+1} \frac{\partial Q}{\partial V} \quad (9)$$

式中: $\partial Q/\partial V$ 为电压/无功灵敏度信息。

实际上,接入地区对风电场提出的无功需求应是前2个控制周期主电网向接入地区注入无功变化量和当前控制周期无功需求量的叠加值,又由于风电接入地区与主电网之间的相互作用,故为了避免过度调节以保留足够的无功调节裕量,采用步进调节的方式,则第 $k+1$ 个控制周期的无功调整量为:

$$\Delta Q_{w,k+1} = \alpha(\Delta Q_{k+1} - \Delta Q_{m,k+1}) \quad (10)$$

式中: $\alpha$ 为无功功率步长/电压偏差调节系数,根据系统实际情况整定,当处于异常控制区时, $\alpha$ 可取较小的值,否则, $\alpha$ 应取一个相对较大的值。

考虑到风电场的无功输出限制,即输出无功功率不能超出风电场的输出无功功率上下限。

### 3.1.2 $\alpha$ 的修正方法

实际调控时,可根据实际测量值与计算值的差值来校正无功/电压偏差调节系数,提高无功控制的精度,保证电压/无功的平稳调节。

根据第  $k+1$  个控制周期的无功调整量和相关灵敏度系数,可得无功控制后的电压计算值为:

$$V_{1,k+1}^{cal} = V_{1,k+1}^{ave} + \Delta V_{1,k+1}^{cal} \quad (11)$$

$$\Delta V_{1,k+1}^{cal} = \Delta Q_{W,k+1} \left( \frac{\partial Q}{\partial V} \right)^{-1} \quad (12)$$

设第  $k+1$  个控制周期无功控制后的电压实际测量值的变化值为  $\Delta V_{1,k+1}^{mea}$ ,则  $\alpha$  可修正为:

$$\alpha' = \left( 1 - \frac{\Delta V_{1,k+1}^{mea} - \Delta V_{1,k+1}^{cal}}{\Delta V_{1,k+1}^{cal}} \right) \alpha \quad (13)$$

式中: $\Delta V_{1,k+1}^{cal}$  为控制电压变化计算值。

### 3.2 故障控制模式

当接入变电站与风电场之间通信出现故障时,风电场无法接收来自接入变电站的信息,只能依靠风电场出口变电站及自身具有的测控装置获取相关运行信息为依据调整输出无功。此时,风电场可在每一控制周期根据控制电压偏差步进地调整输出无功功率。若控制电压推算值异常,则风电场在第  $k+1$  个控制周期输出无功功率的调整量为:

$$\Delta Q_{W,k+1} = \begin{cases} \Delta Q_{step} & \text{异常} \\ (1 + \alpha) \Delta Q_{step} & \text{紧急} \end{cases} \quad (14)$$

式中: $\Delta Q_{step}$  为风电场无功调节步长,若控制电压偏大, $\Delta Q_{step}$  取负,若控制电压偏小, $\Delta Q_{step}$  取正。

待风电场响应并调节完毕之后,若控制电压恢复至正常范围,下一个控制周期风电场保持当前输出功率恒定功率运行;若控制电压没有恢复或控制电压恢复但没有恢复到正常范围,则继续调整,直至控制电压恢复至合格范围或机组调节余量用尽。

## 4 算例分析

测试系统为实际包含风电的国内某区域电网,选取某一个风电场接入的局部作为监视区域进行分析,算例中数据不加说明均为标么值,系统功率基值为 100 MW。所选区域接线如图 2 所示,该风电场由 134 台单机容量 1.5 MW 的变速恒频风电机组构成,功率因数范围为  $\pm 0.95$ ,仿真分析时将整个风电场视为一台等值风力发电机。风电场出口节点和接入点的电压等级为 110 kV,风电场接入变电站低压侧合格电压范围为 0.95~1.05,异常电压范围的上下限分别为 1.1 和 0.9,风电场的运行电压范围为 0.85~1.15。接入点带 2 个本地负荷,其中,负荷 1 为 0.4+j0.13,负荷 2 为 1.2+j0.39。

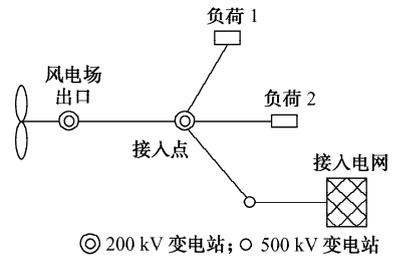


图 2 测试系统  
Fig. 2 Test system

具体分析时,按电网运行要求,本文以每 10 min 内的电压平均值合格为目标<sup>[11]</sup>。再根据低电压运行特性要求,将控制周期定为 30 s<sup>[12]</sup>。在异常控制区,无功功率步长/电压偏差调节系数  $\alpha$  取 0.2;在紧急控制区为 0.4。故障控制模式下的风电场无功功率调节步长  $\Delta Q_{step}$  为 0.075。对比分析风电场在以下 3 种模式下的电压无功响应:

- 1) 风电场采用恒单位功率因数控制方式;
- 2) 当接入变电站与风电场之间通信正常时,采用本文所提出的控制方法;
- 3) 当接入变电站与风电场之间通信故障时,采用本文所提出的控制方法。

风电场接入地区电网的初始运行情况如下:风电场  $V = 0.8704$ ,接入点  $V = 0.8935$ , $Q_m = 1.2411$ , $P = 0.9604$ , $Q = -0.4454$ 。可以看出,接入点电压和风电场均越限,且风电场进入穿越状态。在模式 1 方式下,风电场不输出无功,在主电网无功不足的情况下,风电场有可能脱网,造成风电接入地区电网电压进一步下降,需对风电接入区域内风电场的无功进行调控,以配合区域电网稳定运行。

表 1 给出了模式 2 方式下风电接入地区的无功控制结果。表 1~表 3 中,由于无其他扰动和故障,后 15 个周期与第 5 周期相同,故只给出前 5 个周期的数据。

由表 1 可知,在初始控制周期控制电压和风电场出口母线电压均低于 0.9,若接入变电站与风电场通信正常,风电场无功控制进入紧急控制模式,经过 4 个控制周期,控制电压恢复至 0.9757,风电场输出无功功率为 0.303,风电场出口电压处于合格电压范围内。10 min 内的控制电压平均值为 0.9694,也在合格电压范围之内。表明在接入变电站与风电场通信正常时,采用本文方法能够很好地对风电接入地区提供无功支持。

表 2 给出了模式 3 方式下风电接入区域局部的无功控制结果。由表 2 可知,在初始控制周期控制

电压推算值和风电场出口母线电压均低于 0.9, 由于接入变电站与风电场通信故障, 风电场无功控制进入故障控制模式, 经过第 5 个控制周期, 控制电压恢复至 0.974 5, 注意到在第 5 个控制周期无功调控

时, 由于风电场输出无功功率的限制, 在该阶段的无功调整量只有 0.057, 小于其他几个控制周期。此时, 风电场输出无功功率为 0.312, 风电场出口电压处于合格电压范围内。

表 1 模式 2 方式下的风电接入地区无功控制结果  
Table 1 Reactive control result in mode 2 in wind power integrated region

时段	风电场 V	接入点 V	$\Delta V$	$Q_m$	$\Delta Q_m$	灵敏度	$\Delta Q$	$\alpha$	$\Delta Q_w$
1	0.870 4	0.893 5	0.106 5	1.241 1	0	0.306 75	0.347 2	0.4	0.139
2	0.945 2	0.943 0	0.057 0	0.964 0	-0.277 1	0.242 85	0.234 7	0.2	0.102
3	0.978 2	0.964 7	0.353 0	0.842 3	-0.121 7	0.188 15	0.187 6	0.200 6	0.062
4	0.995 1	0.975 7	0.024 3	0.780 2	-0.062 1	0.168 39	0.144 3	0.200 7	0
5	0.995 1	0.975 7	0.024 3	0.780 2	-0.062 1	0.168 39	0.144 3	0.200 7	0

注: 风电场 V 是指风电场出口母线电压实测值; 接入点 V 是指接入变电站低压侧电压实测值。

表 2 模式 3 方式下的风电接入地区无功控制结果  
Table 2 Reactive control result in mode 3 in wind power integrated region

时段	风电场 V	接入点 V	$\Delta V$	P	Q	$\Delta Q_{step}$	$\alpha$	$\Delta Q_w$
1	0.870 4	0.888 4	0.111 6	0.960 4	-0.445 4	0.075	0.4	0.105
2	0.931 9	0.933 3	0.066 7	0.969 4	-0.233 2	0.075		0.075
3	0.959 5	0.949 2	0.050 8	0.972 2	-0.125 0	0.075		0.075
4	0.982 2	0.964 4	0.035 6	0.973 8	-0.030 0	0.075		0.057
5	0.997 4	0.974 5	0.025 5	0.974 6	0.037 0	0.075		0

注: 风电场 V 是指风电场出口母线电压实测值; 接入点 V 是指由风电场出口母线电压实时测量值推算出的接入变电站低压侧电压值。

表 3 给出了按表 2 进行无功控制时, 接入变电站低压侧电压实际值与表 2 结果的偏差比较。由表 3 可知, 若接入变电站与风电场通信故障, 按照本文所提出的故障控制模式进行风电场无功控制, 控制电压的推算值与实际电压值之间相对误差很小。最后求取 10 min 内的实际控制电压平均值为 0.972 9, 在合格电压范围之内。表明在接入变电站与风电场通信故障时, 采用本文方法仍然能够很好地对风电场无功进行控制, 通过控制电压的推算值有效地将接入变电站低压侧电压控制在合格电压范围之内, 对风电接入地区提供无功支持。

表 3 控制电压实际值与表 2 结果的比较  
Table 3 Comparison between fact value of control voltage and the result of table 2

时段	实际值	推算值	相对偏差/(%)
1	0.893 5	0.888 4	0.57
2	0.934 3	0.933 3	0.11
3	0.952 4	0.949 2	0.33
4	0.967 3	0.964 4	0.30
5	0.977 2	0.974 5	0.27

注: 相对偏差以实际值为基值。

## 5 结语

本文提出了一种兼顾风电接入地区电压/无功需求的风电场无功控制方法。该方法对无功控制区和控制模式进行划分, 并给出相应的判断和选择方

法。对包含风电场的实际电网进行分析, 结果表明: 无论接入变电站与风电场之间通信是否正常, 采用所提出的方法, 均能在很少的控制周期内将控制电压调整到合格范围, 较好地风电接入地区提供无功支持。

附录见本刊网络版 (<http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx>)。

## 参考文献

- [1] HOCHHEIMER J P E. Wind generation integration & operation-technical challenges/issues// Proceedings of 2006 IEEE Power Engineering Society General Meeting, June 18-22, 2006, Montreal, Canada; 6p.
- [2] 梁才浩, 段献忠. 分布式发电及其对电力系统的影响. 电力系统自动化, 2001, 25(12): 53-56.  
LIANG Caihao, DUAN Xianzhong. Distributed generation and its impact on power system. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(12): 53-56.
- [3] 王伟, 孙明冬, 朱晓东. 双馈式风力发电机低电压穿越技术分析. 电力系统自动化, 2007, 31(23): 84-89.  
WANG Wei, SUN Mingdong, ZHU Xiaodong. Analysis on the low voltage ride through of DFIG. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(23): 84-89.
- [4] 胡书举, 李建林, 许洪华. 永磁直驱风电系统低电压运行特性的分析. 电力系统自动化, 2007, 31(17): 73-77.  
HU Shuju, LI Jianlin, XU Honghua. Analysis on the low-voltage-ride-through capability of direct-drive permanent magnetic generator wind turbines. Automation of Electric Power

- Systems, 2007, 31(17): 73-77.
- [5] 贺益康,郑康,潘再平,等. 交流励磁变速恒频风电系统运行研究. 电力系统自动化,2004,28(13):55-60.  
HE Yikang, ZHENG Kang, PAN Zaiping, et al. Investigation on an AC excited variable-speed constant-frequency wind-power generation system. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(13): 55-60.
- [6] 刘其辉,贺益康,张建华. 交流励磁变速恒频风力发电机并网控制策略. 电力系统自动化,2006,30(3):51-56.  
LIU Qihui, HE Yikang, ZHANG Jianhua. Grid connection control strategy of AC-excited variable-speed constant-frequency wind power generator. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(3): 51-56.
- [7] 迟永宁,关宏亮,王伟胜,等. SVC与桨距角控制改善异步机风电场暂态电压稳定性. 电力系统自动化,2007,31(3):95-100.  
CHI Yongning, GUAN Hongliang, WANG Weisheng, et al. Enhancement of transient voltage stability of induction generator based wind farm by SVC and pitch control. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(3): 95-100.
- [8] CHOMPOO-INWAI C, YINGVIVATANAPONG C, METHAPRAYOON K, et al. Reactive compensation techniques to improve the ride-through capability of wind turbine during disturbance. IEEE Trans on Industry Application, 2005, 41(3): 666-672.
- [9] 郎永强,张学广,徐殿国,等. 双馈电机风电场无功功率分析及控制策略. 中国电机工程学报,2007,27(9):77-82.  
LANG Yongqiang, ZHANG Xueguang, XU Dianguo, et al. Reactive power analysis and control of doubly fed induction generator wind farm. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(9): 77-82.
- [10] RUIZ P A, SUAER P W. Voltage and reactive power estimation for contingency analysis using sensitivities. IEEE Trans on Power Systems, 2007, 22(2): 639-647.
- [11] GB 12326—2000 电能质量——电压波动和闪变. 2000.
- [12] ESBNG/EirGrid. Wind farm power station grid code provision [EB/OL]. [2008-06-01]. <http://www.eirgrid.com/EirGridPortal/uploads/Regulation%20and%20Pricing/WFPS1%20version%201.6%2028-7-04.pdf>.

朱凌志(1975—),男,博士,高级工程师,主要研究方向:风力发电系统接入与控制方法。E-mail: zhulingzhi@nari-china.com

陈宁(1983—),男,通信作者,硕士,工程师,主要研究方向:风力发电系统接入与控制方法。E-mail: chenning8375@163.com

王伟(1976—),男,博士研究生,高级工程师,主要研究方向:风力发电机组控制系统研制、电力电子在电力系统中的应用。

## Wind Farm Reactive Power Control Strategy Considering Local Networks Demand

ZHU Lingzhi, CHEN Ning, WANG Wei

(State Grid Electric Power Research Institute, Nanjing 210003, China)

**Abstract:** With more wind power integrated into power grid, its impacts on the main system voltage are more significant. Grid companies require wind farm to provide supports to the main system voltage and reactive power control. Based on this, a reactive power compensation control method of wind farm is proposed considering the voltage and reactive power demand in the main system. The low voltage side of wind farm substation is chosen as controlled point. The reactive power control is divided into four sections, namely, normal control, abnormal control, urgent control and off-grid control. Accordingly, three control modes are given, including abnormal control mode, urgent control mode and fault control mode. In implementation, the average voltage in a specific period is used to classify the reactive power control sections. Further, the control mode selected according to the average voltage difference between two different periods and the communication between the substation and wind farm. An actual system is analyzed. The results show that the reactive power of wind farm can be quickly regulated to support the main system, maintaining the controlled voltage within limits in a measurement cycle.

This work is supported by Key Project of the National Eleventh-Five Year Research Program of China (No. 2008BAA14B04) and State Grid Project.

**Key words:** wind power integrated region; voltage/reactive power command; wind farm; reactive power control; sensitivity

## 附录 A

设 $J$ 为系统极坐标形式的全阶雅可比矩阵， $\Delta Y$ 和 $\Delta X$ 分别为系统注入变量和状态变量，将 $\Delta Y$ 分成两部分，即 $\Delta Y=[\Delta Y_I \ \Delta Y_N]^T$ ，对应的 $\Delta X$ 则变为 $\Delta X=[\Delta X_I \ \Delta X_N]^T$ 。其中， $\Delta Y_I$ 和 $\Delta X_I$ 分别为被控风电场接入地区节点(包括风电场出口节点和接入点)的注入变量和状态变量； $\Delta Y_N$ 和 $\Delta X_N$ 分别为其余节点的注入变量和状态变量。相应地将 $J$ 划分为4部分，则有系统注入量和状态变量之间的关系为：

$$\begin{bmatrix} \Delta Y_I \\ \Delta Y_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{II} & J_{IN} \\ J_{NI} & J_{NN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta X_I \\ \Delta X_N \end{bmatrix} \quad (A1)$$

一般地， $J_{NN}$ 非奇异，设 $\Delta Y_N=0$ ，即实际注入量只包含 $\Delta Y_I$ ，通过矩阵变换可以消去 $\Delta X_N$ ，从而可得：

$$\Delta Y_I = (J_{II} - J_{IN} J_{NN}^{-1} J_{NI}) \Delta X_I = J_{SI} \Delta X_I \quad (A2)$$

设风电接入地区的注入量为风电场和接入点的有功功率和无功功率，状态变量为风电场和接入点的相角和电压，则 $J_{SI}$ 可以表示为：

$$J_{SI} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial \theta} & \frac{\partial P}{\partial V} \\ \frac{\partial Q}{\partial \theta} & \frac{\partial Q}{\partial V} \end{bmatrix} \quad (A3)$$

在式(10)中，选取 $\frac{\partial Q}{\partial V}$ 子阵的相应元素就可以获得所需的电压/无功灵敏度信息。