

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.180991

# 采用改进下垂控制和双层无功优化的风电场 无功均衡分配研究

李生虎, 章怡帆, 于新钰, 张楠

(合肥工业大学电气与自动化工程学院, 安徽 合肥 230009)

**摘要:** 计及风电场详细模型, 按照双馈风电机组(DFIG)无功容量比例分配无功, 难以实现风电场无功裕度均衡控制。根据 DFIG 无功裕度和并网点(PCC)允许电压偏差, 提出可变下垂系数以改进无功-电压控制。结合每台 DFIG 无功裕度及其与 PCC 间电气距离, 定义新的无功不均衡度。针对大规模风电场控制问题, 建立双层无功优化模型, 其中电网层以减小网损、电压偏差和风电场铜耗为目标, 整定电网无功需求量; 风电场层以场内线损、DFIG 铜耗及无功不均衡度最小为目标, 确定各台 DFIG 无功出力。采用有限记忆拟牛顿信赖域(LBFGS-TR)算法求解无功均衡分配方案。算例结果表明, 所提算法可充分利用 DFIG 无功调控能力, 实现风电场无功裕度均衡控制。

**关键词:** 双层模型; 无功电压下垂控制; 电气距离; 无功均衡分配; 无功优化

## Study on reactive power sharing of wind farms with improved droop control and bi-level reactive power optimization

LI Shenghu, ZHANG Yifan, YU Xinyu, ZHANG Nan

(School of Electrical Engineering and Automation, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

**Abstract:** With the detailed model of the wind farm taken into account, it is difficult to achieve reactive power margin sharing by allocating reactive power according to the reactive capacity proportions of the Doubly-Fed Induction Generators (DFIG). According to the reactive power margin of the DFIG and the tolerable voltage deviation at the Point of Common Coupling (PCC), an improved reactive power-voltage droop control incorporating the variable droop coefficient is proposed. Combining the reactive power margin of the DFIG and electrical distance between DFIG and PCC, a novel indicator of the reactive power imbalance is proposed. To deal the control problems of large-scale wind farms, a bi-level reactive power optimization model is established. For the grid level, the reactive power demands of the wind farms that minimize the grid loss, voltage deviation, and copper loss of the wind farms are determined. For the wind farm level, the reactive power sharing among the DFIGs is determined with the control object to minimize the circuit loss of the wind farm, the copper loss of each DFIG, and the reactive power imbalance. The LBFGS-TR optimization algorithm is adopted to solve the reactive power sharing scheme. Simulation results show that the proposed algorithm helps to realize the reactive power margin sharing of the wind farms with the fully utilized reactive power regulation capability of the DFIG.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51877061).

**Key words:** bi-level model; reactive power-voltage droop control; electrical distance; reactive power sharing; reactive power optimization

## 0 引言

双馈风电场数量日益增加, 因风电场输出功率

与风速有关, 风速波动易引起并网点(Point of Common Coupling, PCC)电压波动。双馈风电机组(Doubly-fed Induction Generators, DFIG)作为风电场的无功源提供无功补偿已成为共识<sup>[1-2]</sup>。

每一台 DFIG 与 PCC 间线路阻抗不尽相同, 均

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51877061)

分无功造成不匹配功率消耗在线路阻抗上,且传输距离越长,线损越大,DFIG无功出力对PCC电压支撑作用越弱。如果限制远处DFIG无功出力,虽可减小线损,但会发生定子电压偏低的情况。且以均分无功为标准的无功不均衡度不再适用。因此,有必要研究DFIG运行工况不一致情况下风电场无功分配问题。

针对上述问题的风电场无功电压控制研究已取得一定的进展。文献[3]采用单台机组控制方式,但大规模风电场中该方式的控制复杂程度过高。文献[4]采用同调分区的方式,将具有相似运行特性的机组聚类,但不易分析机组间电气距离对系统损耗的影响。文献[5-6]采用分层控制方式,由电网层和风电场层组成。电网层根据PCC电压整定出风电场整体无功出力;风电场层分配无功任务至各台DFIG。但分层控制时采用了风电场简化模型,忽略了DFIG铜耗对风电场出力的影响,控制效果存在一定误差。

下垂控制策略依据设定的下垂系数自动调节DFIG无功出力,是一种无需机组间通信的无功电压调节手段<sup>[7-9]</sup>。为了克服传统下垂控制策略<sup>[10]</sup>难以应对系统运行条件变化的缺点,文献[11]提出了按照DFIG剩余无功容量比例确定下垂系数,避免无功出力越限的情况。文献[12]根据PCC电压偏差,提出了下垂系数的调节规则,降低其频繁变化增加的控制复杂程度。文献[13]根据线损最小原则设定下垂系数。上述文献多以无功均衡分配为目标,未考虑DFIG无功裕度对分配的影响。

综上,本文提出了改进无功-电压下垂控制策略,引入可变下垂系数,可灵活应对系统运行参数变化。结合DFIG无功裕度和其与PCC间的电气距离,定义新的无功功率不均衡度。建立了基于风电场详细结构的双层无功优化模型,其中,电网层采用等值风电场模型,以网损、电压偏差和风电场铜耗为目标,整定电网无功需求量;风电场层以场内线损、DFIG铜耗及无功不均衡度最小为目标,确定各台DFIG无功出力。采用了有限记忆拟牛顿信赖域(LBFGS-TR)算法求解无功功率均衡分配方案,基于IEEE RTS系统验证了所提算法的有效性。

## 1 改进无功-电压下垂控制策略

大规模风电场中各台DFIG与PCC间线路阻抗不同,其无功出力造成的线路损耗也不尽相同,且无功出力受其自身有功出力及无功裕度的影响,所以各台DFIG对PCC电压的支撑作用不同。根据无功-电压下垂控制特性,机组下垂系数越大,其无功

出力越小,因此可通过调整下垂系数,使得风电场中所有机组无功出力可支撑PCC电压达到参考值。

本文在传统下垂控制策略的基础上,根据PCC电压变化,以降低系统损耗和无功裕度不均衡度为优化目标,提出基于可变下垂系数的无功-电压控制策略。

$$\Delta U_{\text{PCC}} - \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^{n_j} K_{\text{opt},(j-i)} \delta Q_{\text{Gopt},(j-i)} = 0 \quad (1)$$

式中: $\Delta U_{\text{PCC}}$ 为PCC实际电压和参考电压幅值之差; $N$ 为风电场数量; $n_j(j=1, \dots, N)$ 为第 $j$ 个风电场内DFIG台数; $K_{\text{opt},(j-i)}$ 和 $\delta Q_{\text{Gopt},(j-i)}$ 分别为求解优化模型后第 $j$ 个风电场第 $i$ 台DFIG的下垂系数和无功出力与参考出力的差值,无功优化模型及求解见第2节,后文参数省略下标opt。

按照式(1)实现无功功率合理分配,但因PCC电压随风速变化,造成下垂系数频繁改变。引入PCC允许电压偏差 $\Delta U_m$ , $|\Delta U_{\text{PCC}}| \leq \Delta U_m$ 时,下垂系数保持上一控制时刻的值不变; $|\Delta U_{\text{PCC}}| > \Delta U_m$ 时,下垂系数作为优化的决策变量。DFIG无功储备有限,功率不足时无法响应无功分配,此时DFIG运行于恒无功功率控制模式,下垂系数为 $\infty$ 。

$$K_i^{t+1} = \begin{cases} K_i^t, & |\Delta U_{\text{PCC}}| \leq \Delta U_m, \beta Q_{Gi}^{\text{max}} \geq \Delta Q_{Gi} \\ K_{\text{opt},i}, & |\Delta U_{\text{PCC}}| > \Delta U_m, \beta Q_{Gi}^{\text{max}} \geq \Delta Q_{Gi} \\ \infty, & |\Delta U_{\text{PCC}}| > \Delta U_m, \beta Q_{Gi}^{\text{max}} < \Delta Q_{Gi} \end{cases} \quad (2)$$

式中: $K_i^t$ 为 $t$ 时刻第 $i$ 台DFIG的下垂系数; $K_{\text{opt},i}$ 为求解优化模型后的下垂系数; $\beta$ 为不可用无功容量系数; $\Delta Q_{Gi}$ 和 $Q_{Gi}^{\text{max}}$ 分别为第 $i$ 台DFIG的无功裕度和无功极限。

$$\|\Delta Q_{Gi}\|^2 = (Q_{Gi}^{\text{max}} - Q_{Gi})^2 \quad (3)$$

式中, $Q_{Gi}$ 为第 $i$ 台DFIG的无功出力。计及DFIG详细结构,其无功极限为

$$\begin{cases} Q_G^{\text{min}} = -\sqrt{r_s^2 - \left(\frac{P_G}{1-s_{\text{opt}}}\right)^2} - \sqrt{S_{\text{gN}}^2 - \frac{s_{\text{opt}}^2 P_G^2}{(1-s_{\text{opt}})^2}} \\ Q_G^{\text{max}} = \sqrt{r_r^2 - \left(\frac{P_G}{1-s_{\text{opt}}}\right)^2} - \frac{U_s^2}{X_{\text{ss}}} + \sqrt{S_{\text{gN}}^2 - \frac{s_{\text{opt}}^2 P_G^2}{(1-s_{\text{opt}})^2}} \end{cases} \quad (4)$$

式中: $Q_G^{\text{max}}$ 和 $Q_G^{\text{min}}$ 为DFIG无功出力最大和最小值; $P_G$ 为DFIG有功出力; $U_s$ 为定子节点电压; $s_{\text{opt}}$ 为最优转差率; $S_{\text{gN}}$ 为网侧变流器额定容量; $r_s = U_s I_s^{\text{max}}$ 和 $r_r = (X_m U_s I_r^{\text{max}})/(R_s^2 + (X_s + X_m)^2)$ 分别为定子和转子侧无功极限半径, $I_s^{\text{max}}$ 和 $I_r^{\text{max}}$ 分别为定子侧和

转子侧最大电流,  $X_s$  和  $X_m$  分别为定子和励磁电抗,  $X_{ss} = X_s + X_m$ 。

以 3 台 DFIG 为例, 说明本文所提策略与传统策略的差别。风速相同时, 相邻机组的定子节点电压幅值相差较小, 因此无功极限相近。设 3 台 DFIG 无功极限均为  $Q_{\max}$ , 初始无功裕度相同, 连接至 PCC 的阻抗分别为  $Z_1 = Z_2 < Z_3$ , 当 PCC 电压升高至  $U'_{PCC}$ , DFIG 无功出力与下垂特性关系曲线如图 1 所示。基于传统下垂控制策略, 若再次升高 PCC 电压, 第 3 台 DFIG 输出无功功率为  $Q_{G(3')}$ , 此时机组已接近无功极限, 容易发生无功裕度不足的情况。而基于改进下垂控制策略通过调节各台 DFIG 下垂系数, 3 台机组的无功出力(见图 1 横坐标)比下垂系数固定为  $K_0$  时的均衡程度高, 且机组无功出力小, 使得下一时刻机组可用无功容量增加。

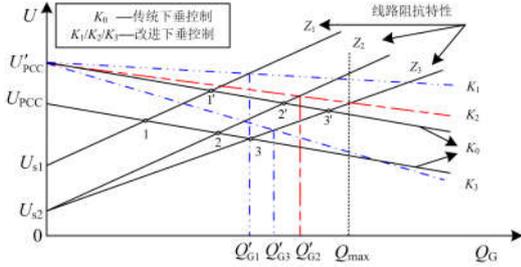


图 1 下垂控制特性曲线

Fig. 1 Characteristic curves of droop control

以等效阻抗表示 DFIG 与 PCC 间电气距离, 为减小线损, 等效阻抗大的 DFIG 无功出力受到限制, 无功容量得不到充分利用, 而等效阻抗小的 DFIG 易达到无功极限。为了合理反映机组无功出力均衡程度, 风电场无功不均衡度  $\eta$  定义为

$$\eta = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \left( \frac{\Delta Q_{Gi}}{Z_{ij, \text{equ}}} - \frac{\Delta Q_G}{n Z_{\text{equ}}} \right)^2 \quad (5)$$

式中:  $\Delta Q_G$  和  $Z_{\text{equ}}$  分别为无功裕度和电气距离向量;  $Z_{ij, \text{equ}} = (Z_{ii} - Z_{ij}) - (Z_{ij} - Z_{jj})$  为节点  $i$  与  $j$  间的等效阻抗。

## 2 风电场双层无功优化模型

风电场群自动电压控制系统<sup>[14]</sup>可实时监控 PCC 电压、各台 DFIG 和无功补偿设备的无功裕度。在其分配层建立风电场双层控制模型, 外层为电网层, 内层为风电场层, 其结构如图 2 所示。

基于 DFIG 详细模型, 忽略定转子机械损耗及电机铁损, DFIG 的有功出力应为机械功率与定转子绕组铜耗之差, 因此 DFIG 的有功和无功出力需通过联立 DFIG 内部节点功率方程<sup>[15]</sup>和电网系统潮

流方程得到

$$\begin{cases} \Delta P_s = -P_{sm} - P_{sg} - P_{Li} - P_i = 0 \\ \Delta Q_s = -Q_{sm} - Q_{sg} - Q_{Li} - Q_i = 0 \\ \Delta P_m = -P_{ms} - P_{mr} = 0 \\ \Delta Q_m = -Q_{ms} - Q_{mm} - Q_{mr} = 0 \\ \Delta P_g = -P_{gm} - P_{gs} = 0 \\ \Delta Q_g = Q_g - Q_{gs} = 0 \\ \Delta T = -P_{WT} / (1-s) - P_{em} = 0 \end{cases} \quad (6)$$

式中: 下标 s、r、m 和 g 分别表示定子、转子、励磁和网侧变流器;  $P_{sm}$ 、 $Q_{sm}$  分别为 s 流向 m 的有功和无功功率, 相同定义不再赘述;  $P_{WT}$  为机械功率;  $P_{em}$  为电磁功率;  $P_{Li}$  和  $Q_{Li}$  为节点  $i$  处有功和无功负荷;  $P_i$  和  $Q_i$  为节点  $i$  注入电网的有功和无功功率。

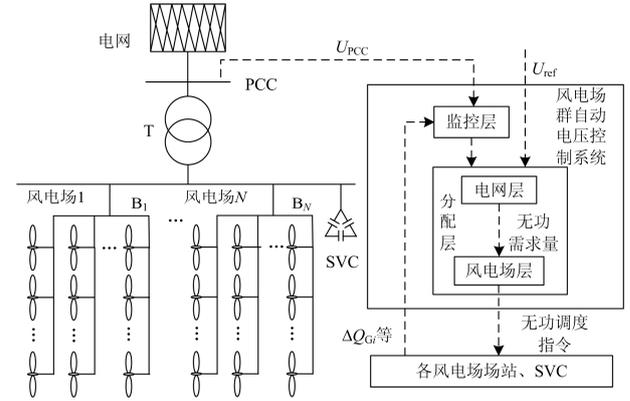


图 2 风电场双层控制模型

Fig. 2 Bi-level control model of wind farms

### 2.1 电网层

风电场经各自母线  $B_i (i=1, \dots, N)$ , 再经升压变压器汇集至 PCC。为使 PCC 电压满足电网要求, 电网层根据改进下垂控制策略式(1), 整定出各风电场整体无功出力。各风电场的无功裕度由风电场层各台 DFIG 可用无功容量极限之和确定。

受场内尾流效应和线路损耗影响, 风电场的有功及无功功率出力不能由各台机组单独出力简单相加得到, 需将风电场按照等值损耗<sup>[16]</sup>的方法进行等值, 使得等值风电场与详细模型的输出功率及损耗等参数相近。其中, 等值风电场的风速  $v_{WT \text{eq}}$  由各台 DFIG 运行于 MPPT 方式下捕获的风能之和反解得到

$$v_{WT \text{eq}} = \left( \frac{8P_{\text{meq}}}{\rho_0 \pi n D_{\text{eq}}^2 C_{\text{peq}}} \right)^{1/3} \quad (7)$$

式中: 下标 eq 表示等值后参数;  $P_{\text{meq}}$  为所有 DFIG 的机械功率之和;  $\rho_0$  为空气密度;  $C_p$  为风能利用系

数;  $D$  为叶轮直径。

减小电网网损以保证系统经济运行; 减小各节点电压偏差使其满足电网安全运行要求; 减小 DFIG 内部定子、转子及变压器的铜耗以增加其有功出力。综上, 电网层的总目标函数设为

$$\min f_w(\mathbf{x}_w) = \alpha_1 P_{\text{grid}} + \alpha_2 \Delta U + \alpha_3 P_{\text{cop,eq}} \quad (8)$$

式中:  $f_w$  和  $\mathbf{x}_w$  分别为电网层无功优化总目标函数和决策变量,  $\mathbf{x}_w$  包括各发电机组输出功率  $P_{\text{GW}}$  和  $Q_{\text{GW}}$ 、各节点(含等值风电场内部)电压幅值  $U_w$  和相角  $\theta_w$ 、下垂系数  $K_w$ ;  $P_{\text{grid}}$ 、 $\Delta U$ 、 $P_{\text{cop,eq}}$  分别为电网层网损、电压偏差和等值风电场铜耗;  $\alpha_1 \sim \alpha_3$  为电网层各目标函数的权重系数。

针对多目标优化, 本文采用目标加权求和方式将其转化为单目标, 由于子目标的量纲不同无法直接相加, 故利用 logistic 模式对子目标函数进行归一化处理。该处理方式同样适用于风电场层。

## 2.2 风电场层

风电场层计及风电场内线路连接及 DFIG 内部结构, 将电网层整定得到的整体无功出力合理分配至各台 DFIG。风电场层需满足风电场等值前后传输至母线  $B_i$  处无功功率是一致的。

风电场层采用改进下垂控制策略, 以减小场内线路损耗、DFIG 铜耗和无功不均衡度为目标, 实现无功合理分配。风电场层无功优化总目标函数为

$$\min f_D(\mathbf{x}_D) = \alpha_4 P_{\text{cir}} + \alpha_5 P_{\text{cop}} + \alpha_6 \eta \quad (9)$$

式中:  $f_D$  和  $\mathbf{x}_D$  分别为风电场层无功优化总目标函数和决策变量,  $\mathbf{x}_D$  包括各台 DFIG 的有功及无功出力  $P_{\text{GD}}$  和  $Q_{\text{GD}}$ 、各节点(含 DFIG 内部)电压幅值  $U_D$  和相角  $\theta_D$ 、下垂系数  $K_D$ ;  $P_{\text{cir}}$ 、 $P_{\text{cop}}$ 、 $\eta$  分别为风电场层的线损、机组铜耗和无功不均衡度;  $\alpha_4 \sim \alpha_6$  为风电场层各目标函数的权重系数。

## 2.3 基于 LBFGS-TR 优化算法的双层模型求解

计及 DFIG 精确模型的双层模型无功优化约束除传统无功优化约束条件<sup>[17]</sup>外, 还包括各层控制策略、无功极限和 DFIG 节点功率方程, 即式(1)、式(4)和式(6)。可见, 本文无功优化问题是一个多变量、多约束的非线性问题。构建拉格朗日函数  $L(\mathbf{x}, \boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{\sigma})$ , 将有约束问题转化为无约束问题

$$L(\mathbf{x}, \boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{\sigma}) = f(\mathbf{x}) - \sum_{i=1}^{l_h} \lambda_{hi} h_i(\mathbf{x}) + \frac{\sigma}{2} \sum_{i=1}^{l_g} h_i^2(\mathbf{x}) + \frac{1}{2\sigma} \sum_{i=1}^{l_g} \left\{ \left[ \max(0, \lambda_{gi} - \sigma g_i(\mathbf{x})) \right]^2 - (\lambda_{gi})^2 \right\} \quad (10)$$

式中:  $h$  和  $g$  分别为等式和不等式约束;  $\lambda_h$  和  $\lambda_g$  为

拉格朗日乘子;  $l_h$  和  $l_g$  为约束个数;  $\sigma$  为惩罚因子。

采用 LBFGS-TR 算法求解上述无约束问题, 详细计算流程如图 3 所示。与线性搜索方法相比, TR 算法通过求解二次模型得到第  $k$  次迭代的试探步长  $\mathbf{d}_k$ , 无需确定搜索方向, 具有二阶收敛性<sup>[18]</sup>。TR 二次模型为

$$\begin{cases} \min \varphi_k(\mathbf{d}_k) = L(\mathbf{x}_k) + \mathbf{g}_k^T \mathbf{d}_k + \frac{1}{2} \mathbf{d}_k^T \mathbf{B}_k \mathbf{d}_k \\ \text{s.t. } \|\mathbf{d}_k\|_2 \leq r_k \end{cases} \quad (11)$$

式中:  $r_k$  为第  $k$  次迭代的信赖域半径;  $\mathbf{g}_k = \nabla L(\mathbf{x}_k)$  和  $\mathbf{B}_k = \nabla^2 L(\mathbf{x}_k)$  分别为  $L(\mathbf{x}, \boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{\sigma})$  在当前迭代点  $\mathbf{x}_k$  的梯度向量和海森矩阵。

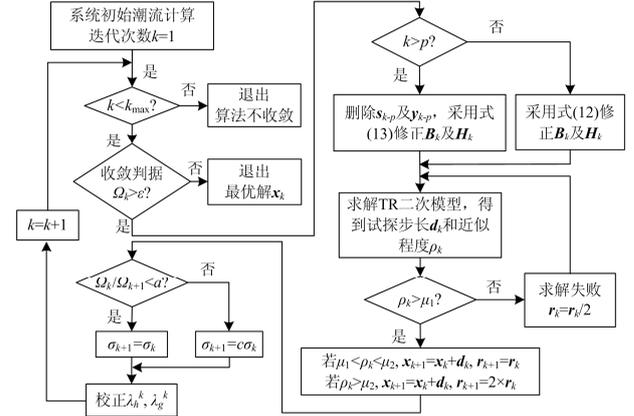


图 3 LBFGS-TR 优化算法流程

Fig. 3 Flowchart of LBFGS-TR optimization algorithm

无功优化涉及的变量和功率方程较多, 求解海森矩阵的过程较为繁琐, 且每次迭代需重新计算  $\mathbf{B}_k$ 。因此, 本文采用 BFGS 算法, 利用目标函数值和一阶导数信息构造出近似海森矩阵代替二阶求导, 减少计算量。BFGS 修正方程为

$$\mathbf{B}_{k+1} = \mathbf{B}_k + \frac{\mathbf{y}_k \mathbf{y}_k^T}{\mathbf{y}_k^T \mathbf{s}_k} - \frac{\mathbf{B}_k \mathbf{s}_k \mathbf{s}_k^T \mathbf{B}_k}{\mathbf{s}_k^T \mathbf{B}_k \mathbf{s}_k} \quad (12)$$

式中:  $\mathbf{s}_k = \mathbf{x}_{k+1} - \mathbf{x}_k$ ;  $\mathbf{y}_k = \mathbf{g}_{k+1} - \mathbf{g}_k$ 。

由式(12)可知, BFGS 修正方程需要记忆  $m \times m$  ( $m$  为变量个数)阶近似海森矩阵。为了节省存储空间, 加入有限记忆法<sup>[19]</sup>, 只利用近  $p$  次曲率  $(\mathbf{s}_k, \mathbf{y}_k)$  修正近似海森矩阵, 使得存储空间减少为  $2p \times m$ 。LBFGS 的修正公式为

$$\mathbf{H}_{k+1} = (\mathbf{V}_k^T \cdots \mathbf{V}_{k-p}^T) \mathbf{H}_k^{(0)} (\mathbf{V}_{k-p} \cdots \mathbf{V}_k) + q_k \mathbf{s}_k \mathbf{s}_k^T + \sum_{i=0}^{p-1} q_{k-p+i} \left( \prod_{l=0}^{p-i-1} \mathbf{V}_{k-l}^T \right)^T \mathbf{s}_{k-p+i} \mathbf{s}_{k-p+i}^T \left( \prod_{l=0}^{p-i-1} \mathbf{V}_{k-l} \right) \quad (13)$$

式中:  $\mathbf{H}_k$  与  $\mathbf{B}_k$  互为逆矩阵;  $\mathbf{V}_k = (\mathbf{I} - q_k \mathbf{y}_k \mathbf{s}_k^T)$ ;  $q_k = 1 / (\mathbf{s}_k^T \mathbf{y}_k)$ ;  $\mathbf{H}_k^{(0)} = (\mathbf{s}_k^T \mathbf{y}_k) \mathbf{I} / (\mathbf{y}_k^T \mathbf{y}_{k-1})$ 。

### 3 算例分析

为了验证本文所提下垂控制策略和双层模型的有效性, 在 IEEE RTS 24 节点系统上扩展 3 个含 25 台 DFIG(5 行×5 列)的风电场, 风电场经升压变压器接入额定电压为 230 kV、基准功率为 100 MW 的电网, 结构同图 2。风电场额定电压为 690 V, 单台 DFIG 容量为 2 MW, 详细参数见文献[20]。PCC 参考电压  $U_{ref}$  为 1 p.u., 允许电压偏差  $\Delta U_m$  为  $1\%U_{ref}$ , DFIG 不可用无功容量系数  $\beta$  为 0.2。电网层权重系数  $\alpha_1 \sim \alpha_3$  分别为 0.38、0.34、0.28; 风电场层权重系数  $\alpha_4 \sim \alpha_6$  分别为 0.23、0.57、0.20。LBFGS-TR 算法参数取自文献[18]。采用来自 AWOS 的历史风速数据[21], 任意截取其中 40 min 风速, 采样周期为 1 min。

#### 3.1 双层模型有效性检验

为了验证风电场等值模型的准确性, 对比分析了风电场详细模型和等值模型的机械功率及输出有功功率随风速变化的情况, 如图 4 所示。采用 Jensen 尾流模型[22]计算各台 DFIG 的风速。

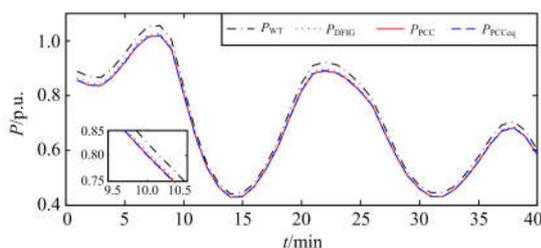


图 4 风电场详细模型与等值模型输出有功功率对比  
Fig. 4 Comparison of active power output of detailed and equivalent model of wind farms

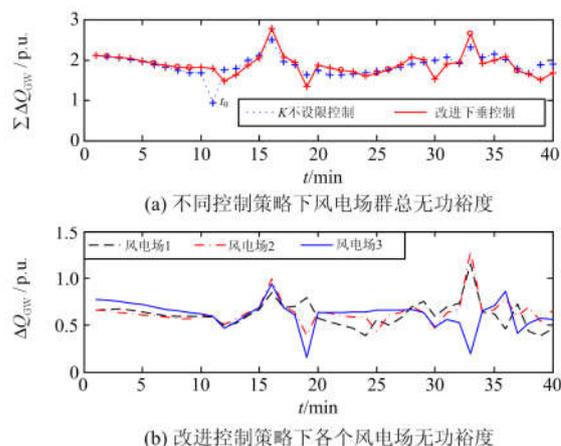
由图 4 可以看出, 40 min 内风电场平均有功出力比平均机械功率减少了 2.44%, 因此等值风电场的铜耗不可忽略。风电场等值模型与详细模型有功出力在  $t=10$  min 时相差最大, 误差为 0.1%, 可知本文等值模型是准确的, 即双层模型计算结果可信。

#### 3.2 基于改进下垂控制策略的双层无功分配效果

为了验证本文所提算法能充分利用 DFIG 无功能力, 并提高无功分配合理性, 对比分析了本文算法和下垂系数不设限的控制策略随风速波动对 DFIG 无功出力和无功裕度的影响。无功功率控制周期与风速采样周期相同。

由图 5(a)可以看出, 与下垂系数不设限控制策略的风电场群总无功裕度相比, 改进下垂控制策略使得下垂系数在 40 min 内变化次数减少了 9 次, 且

明显增大了 PCC 电压波动小于  $\Delta U_m$  时刻的无功裕度, 并减少了无功裕度接近最小值的情况, 如  $t=11$  min 时。基于改进下垂控制策略, 3 个风电场的无功裕度变化趋势不同, 如图 5(b)。结合风速变化可知, 风速越小, 风电场无功裕度越小, 如  $t=34$  min 时, 第 3 个风电场的风速最小, 其无功裕度也最小。



注: “o”表示该时刻 PCC 电压波动小于  $\Delta U_m$ ; “+”表示该时刻下垂系数经无功优化后确定;  $t_0$  表示该时刻风电场无功裕度不足, SVC 补足缺少的无功功率。

图 5 风电场无功裕度曲线

Fig. 5 Reactive power margin curve of wind farms

图 6 为各风电场下垂系数变化曲线。结合图 5 和图 6 可以看出, 风电场在 DFIG 有功出力较大的时刻 ( $t=7$  min 和 21 min), 维持 PCC 电压水平所需的 DFIG 无功出力也较大, 对应的下垂系数较小, 所得结论与图 1 的理论分析相同。

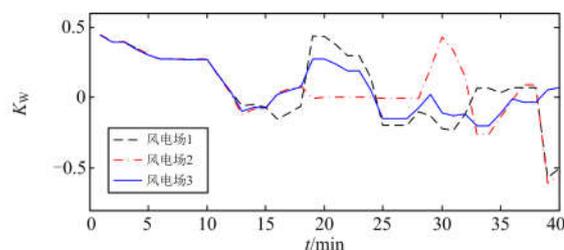


图 6 下垂系数变化

Fig. 6 Variation of droop coefficient

不同无功优化目标下的系统无功裕度均衡程度对比见表 1。分析在本文控制策略下风电场层同一时刻 ( $t=19$  min) 各台 DFIG 无功出力情况, 如图 7 所示。电网层 PCC 电压幅值为 1.005 4 p.u., 3 个风电场各自母线电压均为 1.02 p.u., 各风电场整体无功出力分别为 0.216 7 p.u.、0.217 9 p.u. 和 0.219 0 p.u.。

表 1 不同控制目标下风电场无功裕度均衡程度对比  
Table 1 Comparison of reactive power margin sharing under different control objects

控制目标 $f(x)$	0(无优化)	$\alpha_4 P_{cir}$	$\alpha_4 P_{cir} + \alpha_5 P_{cop}$	$\alpha_4 P_{cir} + \alpha_5 P_{cop} + \alpha_6 \eta$
无功不均衡度 ( $\times 10^{-7}$ )	10.263 9	5.189 1	4.978 5	4.117 6

由表 1 可以得到, 基于改进下垂控制策略的 3 个风电场的无功裕度均衡程度比不考虑优化时提高了 59.88%, 比只优化线损时提高了 20.65%。可知, 本文所提控制策略减小了机组间无功裕度的差距。

为了减小线损, 电气距离大的机组应减小无功出力, 对比图 7 中各行 DFIG 无功出力可知, 第 1 行 DFIG 的输电线路最短, 其无功出力最大。由式 (4) 可知, DFIG 无功出力上限随其定子电压增大而减小, 随其有功出力增大而减小。综合定子电压和有功出力这两个因素, 各风电场的第 2 列 DFIG 的无功极限最小, 为了实现无功裕度均衡控制, 该列 DFIG 的无功出力也最小。本文算法得到的各台 DFIG 无功出力更符合电网经济运行的要求。

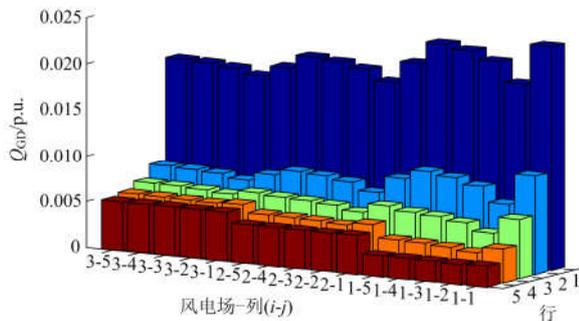


图 7 风电场层各台 DFIG 无功出力

Fig. 7 Reactive power output of each DFIG

## 4 结论

本文考虑 DFIG 运行工况不一致的情况, 提出了基于可变下垂系数的改进无功-电压控制策略和风电场双层无功优化模型。研究表明:

1) 等值风电场模型及风电场层无功分配均考虑了风电场内详细结构, 可减小无功调度指令误差, 使得双层模型控制效果更可靠。

2) 改进下垂控制策略依据风速变化灵活调节下垂系数, 实时调整系统运行参数, 实现了无功裕度均衡控制, 增加了下一时刻可调控的无功容量。

3) 无功不均衡度定量描述了无功分配与 DFIG 无功裕度及电气距离间的关系, 使得 DFIG 满足电气距离越小, 无功出力越大, 裕度越小。

## 参考文献

- [1] ZHANG B, HOU P, HU W, et al. A reactive power dispatch strategy with loss minimization for a DFIG-based wind farm[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2016, 7(3): 914-923.
- [2] JUNG S, JANG G. A loss minimization method on a reactive power supply process for wind farm[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(4): 3060-3068.
- [3] 郭倩, 林燎源, 武宏彦, 等. 一种改进的分布式电源无功功率精确分配下垂控制策略[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(15): 30-34.  
GUO Qian, LIN Liaoyuan, WU Hongyan, et al. An improved droop control strategy for accurate reactive power sharing among distributed generator[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(15): 30-34.
- [4] 余乐, 张茜, 刘燕, 等. 含分布式电源的配电网无功补偿分区平衡优化调节方法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(5): 58-64.  
YU Le, ZHANG Xi, LIU Yan, et al. An adjustment method of distribution network reactive power compensation partition balance with distributed power sources[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(5): 58-64.
- [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] 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): 8-14.  
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): 8-14.
- [7] HAIDER S, LI G, WANG K. A dual control strategy for power sharing improvement in islanded mode of AC microgrid[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(3): 111-118. DOI: 10.1186/s41601-018-0084-2.
- [8] 麦倩屏, 陈鸣. 用于多微源低压微电网的虚拟阻抗反下垂控制[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(1): 96-102.  
MAI Qianping, CHEN Ming. P-V/Q-f droop control strategy with virtual impedance for low-voltage microgrid with multiple micro sources[J]. Power System Protection

- and Control, 2018, 46(1): 96-102.
- [9] 刘宁宁, 曹炜, 赵晋斌. 直流微电网的一种增量式下垂控制方法[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(8): 24-30.  
LIU Ningning, CAO Wei, ZHAO Jinbin. An incremental droop control method for DC micro-grid[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(8): 24-30.
- [10] 赵嘉兴, 高伟, 上官明霞, 等. 风电参与电力系统调频综述[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(21): 157-169.  
ZHAO Jiaying, GAO Wei, SHANGGUAN Mingxia, et al. Review on frequency regulation technology of power grid by wind farm[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(21): 157-169.
- [11] GU Y, XIANG X, LI W, et al. Mode-adaptive decentralized control for renewable DC microgrid with enhanced reliability and flexibility[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(9): 5072-5080.
- [12] 刘瑜超, 武健, 刘怀远, 等. 基于自适应下垂调节的VSC-MTDC功率协调控制[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(1): 40-48.  
LIU Yuchao, WU Jian, LIU Huaiyuan, et al. Effective power sharing based on adaptive droop control method in VSC multi-terminal DC grids[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(1): 40-48.
- [13] 冉晓洪, 苗世洪, 吴英杰, 等. 基于最优功率分配的多端直流网络改进下垂控制策略[J]. 电工技术学报, 2016, 31(9): 16-24.  
RAN Xiaohong, MIAO Shihong, WU Yingjie, et al. An improved droop control strategy for multi-terminal DC grids based on optimal active power allocation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(9): 16-24.
- [14] 杨珺, 郝敬, 薄志谦. 基于相邻经验粒子群算法的风电场集群无功电压分层控制策略[J]. 电网技术, 2017, 41(6): 1823-1829.  
YANG Jun, HAO Jing, BO Zhiqian. Hierarchical control strategy for reactive power and voltage of wind farm cluster based on adjacent experiential particle swarm optimization[J]. Power System Technology, 2017, 41(6): 1823-1829.
- [15] LI S. Operation region of doubly fed induction generators based on rotor slip under maximum power point tracking control and power dispatch[J]. Electric Power Components & Systems, 2014, 42(8): 808-817.
- [16] 陈继明, 王辉, 仇志华. 双馈风电场等值准确度研究[J]. 电网技术, 2014, 38(7): 1867-1872.  
CHEN Jiming, WANG Hui, ZHANG Zhihua. Research on equivalent accuracy of wind farm composed of DFIGs[J]. Power System Technology, 2014, 38(7): 1867-1872.
- [17] 周仕豪, 唐飞, 刘涤尘, 等. 考虑降低暂态电压失稳风险的动态无功优化配置方法[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(7): 68-75.  
ZHOU Shihao, TANG Fei, LIU Dichen, et al. A dynamic VAR optimal configuration method for reducing the risk of transient voltage instability[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(7): 68-75.
- [18] 王宜举, 修乃华. 非线性最优化理论与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2016: 211-218.
- [19] 韦增欣, 陆莎. 非线性优化算法[M]. 北京: 科学出版社, 2016: 148-183.
- [20] NOURELDEEN O, HAMDAN I. Design of robust intelligent protection technique for large-scale grid-connected wind farm[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(3): 169-182. DOI: 10.1186/s41601-018-0090-4.
- [21] AWOS network[DB/OL]. [2017-08-01]. <http://mesonet.agron.iastate.edu/request/awos/1min.php>.
- [22] 徐玉琴, 刘丹丹. 基于两步分群法的双馈机组风电场等值建模[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(6): 108-114.  
XU Yuqin, LIU Dandan. Equivalence of wind farms with DFIG based on two-step clustering method[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(6): 108-114.

收稿日期: 2018-08-05; 修回日期: 2018-10-17

作者简介:

李生虎(1974—), 男, 通信作者, 博士, 教授, 博士研究生导师, 研究方向为电力系统规划与可靠性、风电系统分析与控制及柔性输电在电力系统中的应用; E-mail: shenghuli@hfut.edu.cn

章怡帆(1994—), 女, 硕士研究生, 研究方向为风电系统优化运行与控制; E-mail: zhang\_yifan@mail.hfut.edu.cn

于新钰(1996—), 女, 硕士研究生, 研究方向为风电稳态分析与优化. E-mail: 2018110351@mail.hfut.edu.cn

(编辑 周金梅)