

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.220401

考虑风电机组无功潜力的风电场无功电压控制策略

王耀翔¹, 戴朝波², 杨志昌², 胥国毅¹, 毕天姝¹

(1. 新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学), 北京 102206; 2. 先进输电技术国家重点实验室(国网智能电网研究院有限公司), 北京 102209)

摘要: 双馈异步风电机组可以提供无功功率参与电网无功调节, 但是其无功功率范围具有不确定性, 导致在制定风电场无功电压控制策略时存在困难。对此提出双馈风电场无功支撑范围评估方法, 并基于评估结果优化风电场参与电网调压的无功控制策略。首先, 基于双馈风电机组有功功率数据, 估算出机组的无功功率极限, 并分析了风电场的无功容量构成及计算方法。然后, 通过两阶段评估方法评估风电场容量。第一阶段获得风电场最大无功支撑范围, 第二阶段校验风电场在各种不确定条件下的无功调节能力。在此基础上, 以减小风电场节点电压偏差、降低网络损耗和利用风电机组无功潜力为目标, 构建多目标问题, 并利用优化算法求解。最后, 通过算例证明所提控制策略可以在充分利用风电机组无功潜力的前提下, 减少风电场节点电压偏差和网络损耗。

关键词: 双馈异步风电机组; 风电场; 无功支撑范围; 控制策略

Voltage control strategy for a wind farm considering the reactive capability of DFIGs

WANG Yaoxiang¹, DAI Chaobo², YANG Zhichang², XU Guoyi¹, BI Tianshu¹

(1. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources (North China Electric Power University), Beijing 102206, China; 2. State Key Laboratory of Advanced Power Transmission Technology (State Grid Smart Grid Research Institute Co., Ltd.), Beijing 102209, China)

Abstract: The doubly-fed induction generator can provide reactive power to participate in reactive regulation of the grid, but its reactive power range is uncertain. This leads to difficulties in designing voltage control strategies for wind farms. A method to evaluate reactive power range of a wind farm is proposed, and a reactive power control strategy for wind farms participating in grid regulation is given based on the evaluation results. First, the reactive power limit of the turbine is estimated based on the active power. The reactive power capacity composition and calculation method of the wind farm are also analyzed. Then the reactive power capacity of the wind farm is assessed by a two-stage evaluation method. In the first stage, the maximum reactive power support range of the wind farm is obtained, and in the second stage, the reactive power capability is verified considering the uncertainty. A multi-objective optimization problem is constructed with the objectives of reducing voltage deviations, network losses and making full use of the reactive power potential of individual wind turbines. The problem is solved with an optimization algorithm. Finally, the simulation analysis has proved that under the premise of optimum utilization of the reactive power potential of the wind turbines, the voltage deviation and network loss of the wind farm can be reduced.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51725702).

Key words: doubly fed induction generator; wind farm; reactive power support range; control strategy

0 引言

随着风力发电等新能源在电力系统中所占比重

越来越高^[1], 新能源场站主动支撑电压的稳定, 逐渐成为电力系统维持电压稳定的重要手段^[2], 但是由于风电场输出的有功功率受风速影响具有不确定性, 风电场可输出的无功功率区间受到有功功率波动的影响^[3], 存在不确定性, 这使得制定风电场参与无功调压的控制策略变得困难。因此有必要评估

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51725702); 国网公司科技项目资助(SGGR0000WLJS2101325)

风电场的可信无功容量区间, 并进一步制定出适合工程应用的无功电压控制策略。这对于保障系统的电压调节能力, 保证系统安全稳定运行具有重要意义^[4]。

当前评估风电场无功调压能力的文献, 主要集中在对风电场无功调压能力的后评估以及对不同控制策略下风电场无功调压能力的评估。文献[5-6]提出一种双馈异步发电机(doubly fed induction generator, DFIG)无功极限的计算方法, 将定子与网侧变换器的无功极限之和定义为风电机组无功极限, 并给出双馈风电场的无功功率极限分析方法, 但是它并未考虑风电场中风电机组以外无功设备的无功补偿能力及运行情况变化下的无功调节能力。为了评估风电场整体的无功调压能力, 文献[7-8]通过建立风电场模型, 采集场站并网电压、无功补偿装置容量和风电机组无功裕度等指标, 基于组合赋权方法来评估风电场的无功调压能力。考虑风电机组有功波动对风电场无功功率极限的影响, 文献[9-11]提出风电机组输出的无功功率跟随机组无功裕度变化的变下垂控制策略, 对比不同控制策略下风电场的无功输出能力和并网点电压来评估风电场无功调压能力。以上文献虽然充分挖掘了风电机组无功支撑潜力, 但它们本质上是将各台机组的无功功率极限作简单叠加, 得到风电场无功输出能力。在工程应用中, 还应当考虑风电场有功输出、并网点电压波动等不确定因素及网络潮流约束, 获得置信的风电场无功支撑范围。

风电场无功容量的评估结果, 可用于制定风电场无功电压控制策略, 目前风电场采用 AVC 控制策略^[9], 通过风电场协调决策模块, 将风电场无功需求指令分发给风电机组和其他无功补偿设备。为解决无功指令在风电机组和无功补偿设备间的分配问题, 以及不同设备间的协调控制问题, 提出了不同的控制策略。文献[12-13]提出定下垂控制策略, 根据实际电压和目标电压的偏差, 通过 PI 控制器获得无功指令。定下垂控制模式下, 风电机组无功输出指令不能超过无功裕度最小机组的无功上限, 容易导致无功裕度小的机组满载, 而无功裕度大的机组无功调压潜力得不到充分发挥。因此, 文献[14-16]提出了变下垂控制方式, 根据机组无功裕度分配无功指令, 提高机组无功支撑潜力的利用率, 但是如果只考虑单机无功潜力大小来制定风电场机组的无功指令, 可能造成风电场中靠近并网点的节点电压偏高, 以及场站损耗增大。因此, 文献[17-19]提出以风电场网络损耗和节点电压偏差作为控制目标, 通过优化算法求得风电场无功指令, 但它没有把单机无功潜力因素纳入考虑范围。现有文献多为单从

某一研究角度出发寻求最优控制策略, 忽略了风电场整体运行的稳定性和经济性, 不能兼顾发挥风电机组无功潜力和减少节点电压偏差的控制目标。受文献[20-21]启发, 本文提出基于预测数据评估风电场可信无功调节容量的方法, 并进一步制定出适用于工程现场应用的无功电压控制策略。本文主要工作如下:

1) 由 DFIG 无功功率极限计算方法推导出机组 PQ 极限图, 并提出基于 DFIG 有功功率预测数据估算无功功率极限的方法;

2) 考虑风电场潮流、风电机组容量和无功补偿设备的约束, 提出风电场无功容量计算方法, 分析各种不确定情况下风电场的无功功率, 得到可信的无功支撑范围;

3) 考虑减少风电场节点电压偏差、减少有功网损和充分利用 DFIG 无功潜力等控制目标, 制定出多目标问题, 并利用优化算法求解获得控制策略。

1 风电场无功容量

1.1 双馈风电机组无功功率极限

双馈异步风电机组由绕线转子异步发电机和转子侧的背靠背功率变流器构成, 发电机定子直接与电网相连, 双馈机组通过定子端和转子端将功率传递到电网^[22]。双馈机组定子侧输出功率范围主要受转子侧换流器的控制, 定子侧无功功率极限^[4]为

$$\begin{cases} Q_{s\max} = -\frac{3u_s^2}{2X_s} + \sqrt{\left(\frac{3X_m}{2X_s}u_s I_{r\max}\right)^2 - P_s^2} \\ Q_{s\min} = -\frac{3u_s^2}{2X_s} - \sqrt{\left(\frac{3X_m}{2X_s}u_s I_{r\max}\right)^2 - P_s^2} \end{cases} \quad (1)$$

式中: u_s 为定子电压幅值; X_s 为定子电抗; X_m 为励磁电抗; P_s 为双馈风机定子侧传递到电网的有功功率; $I_{r\max}$ 为转子侧换流器最大电流; $Q_{s\max}$ 为定子侧向电网发出的无功功率最大值; $Q_{s\min}$ 为定子侧从电网吸收的无功功率最大值。

为了保证良好的输入特性, 网侧变流器一般运行在单位功率因数状态, 其容量一般按风电机组的最大转差功率设计。设 S_c 为网侧变流器容量, 其发出和吸收的无功功率由 $Q_c^2 + P_c^2 \leq S_c^2$ 计算, 可以得到转子侧无功功率的极限值。

$$\begin{cases} Q_{c\max} = \sqrt{S_c^2 - (sP_s)^2} \\ Q_{c\min} = -\sqrt{S_c^2 - (sP_s)^2} \end{cases} \quad (2)$$

式中: $Q_{c\max}$ 为网侧变流器从电网吸收的无功功率最大值; $Q_{c\min}$ 为网侧变流器向电网发出的无功功率最

大值; s 为风机转差率。

由此得到 DFIG 向电网输送的无功功率极限为

$$\begin{cases} Q_{g\max} = Q_{s\max} - Q_{c\min} \\ Q_{g\min} = Q_{s\min} - Q_{c\max} \end{cases} \quad (3)$$

考虑上述约束条件, 根据双馈风电机组参数, 可得到 1.5 MW 的 DFIG 功率极限图, 如图 1 所示。

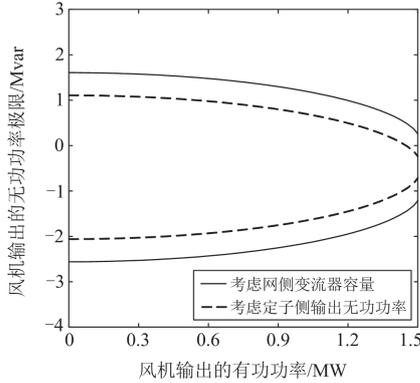


图 1 DFIG 功率极限图

Fig. 1 Power limit diagram of a single DFIG

图中虚线表示只考虑定子侧无功功率极限的曲线, 实线表示考虑网侧变流器吸收和发出无功能力的曲线。网侧变流器可以看作一个动态控制的无功功率源, 向电网注入无功功率, 扩展风电机组无功功率的极限。

1.2 双馈风电场无功容量构成

风电场内无功补偿设备提供的无功容量之和减去无功损耗, 可得到双馈风电场的无功调节容量。双馈风电场的无功功率调节设备包括双馈风电机组、可投切电容器组、静态无功补偿器(static var compensator, SVC)、静态无功发生器(static var generator, SVG)和有载调压变压器(on load tap changing transformer, OLTC)。其中, 可投切电容器组属于离散无功补偿设备, 需要提前制定投切计划, 在无功补偿时可作粗补偿设备; DFIG 和 SVG/SVC 属于动态无功补偿设备, 在无功补偿时可作精补偿; 有载调压变压器无功调节能力有限, 可作为辅助调压设备。

无功功率损耗包括风电场内的箱变压器、集电线路和输电网络的主变压器和架空线路损耗等, 其中变压器无功损耗占 80%左右^[15]。变压器无功损耗的表达式为

$$\Delta Q_T = \Delta Q_0 + \Delta Q_k \cdot (S_a / S_N) \quad (4)$$

式中: ΔQ_0 为变压器空载无功损耗, $\Delta Q_0 = I_0 \% \times S_N / 100$, $I_0 \%$ 为变压器空载电流百分比; ΔQ_k 为变压器短路无功损耗, $\Delta Q_k = U_k \% \times S_N / 100$, $U_k \%$ 为

变压器短路电压百分比; S_a 为计算功率; S_N 为额定功率。

线路无功损耗表达式为

$$\Delta Q = \frac{S^2}{U^2} X = \frac{P^2 + Q^2}{U^2} X \quad (5)$$

式中: S 为线路传输的视在功率; U 为线路电压; X 为线路电抗; P 和 Q 分别为线路传输的有功功率和无功功率。

2 风电场无功容量估计

基于风电机组有功功率预测数据评估风电场无功支撑能力, 其结果可用于判断系统的无功容量是否充足, 也便于提前制定风电场无功补偿设备动作计划。本节考虑双馈风电机组有功功率波动、并网电压波动、SVG 动态无功补偿装置无功容量以及电容器组和变压器分接头变比等离散变量, 建立求解风电场无功支撑范围的两阶段容量评估方法, 其流程图如图 2 所示。

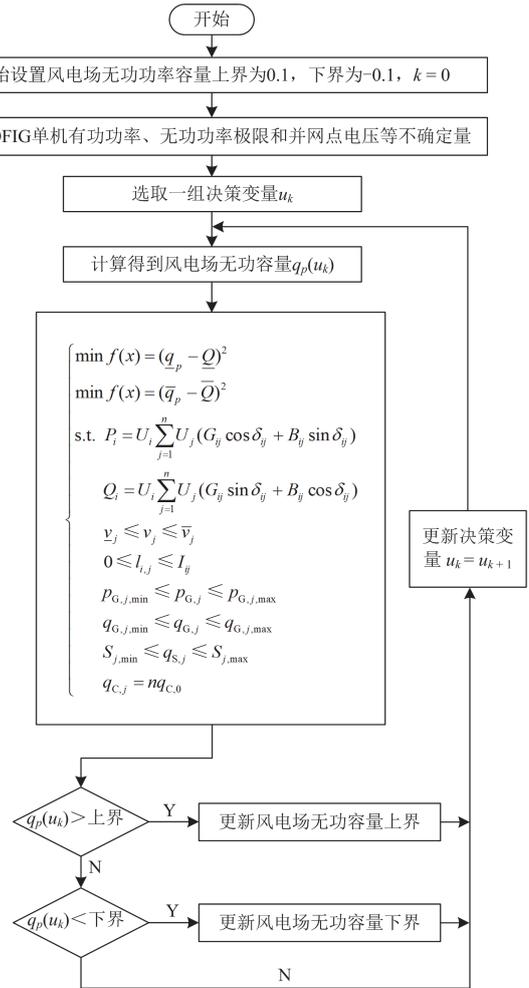


图 2 两阶段容量评估方法流程图

Fig. 2 Flowchart of the two-stage capacity evaluation method

2.1 风电场建模

根据实际风电场的拓扑图、风电机组数据、无功补偿装置数据、线路和变压器参数，建立包含风电场、输电线路和电网侧网络的潮流计算模型。

2.2 目标函数

目标函数是求解风电场向电网输送的最大无功功率， \bar{q}_p 表示风电场从电网吸收的最大无功功率， \underline{q}_p 表示风电场向电网提供的最大无功功率。 \bar{Q} 和 \underline{Q} 分别为风电场并网点无功功率的上下限。

$$\begin{cases} \min f(x) = (\underline{q}_p - \underline{Q})^2 \\ \min f(x) = (\bar{q}_p - \bar{Q})^2 \end{cases} \quad (6)$$

2.3 不确定变量

评估方法考虑了 DFIG 有功功率、DFIG 无功出力 and 风电场并网点(point of common coupling, PCC) 电压幅值等不确定性变量对风电场无功支撑范围的影响。风电机组有功功率 $p_{G,j}$ 受风速影响，为不确定量；DFIG 无功功率 $q_{G,j}$ 的范围受有功功率的影响，也是不确定量。在计算过程中，首先确定单台机组运行的有功功率基准值，再通过历史数据统计单台机组的有功功率波动范围，得到 DFIG 有功功率运行区间，以此估算出 DFIG 的无功功率范围。风电场并网点电压 v_{PCC} 受电力系统运行情况的影响，也是不确定量，本模型中取 v_{PCC} 的上下限作为约束条件。

2.4 约束条件

风电场潮流受各项约束条件的限制^[16]，主要考虑网络潮流约束条件、无功补偿装置的无功容量约束、DFIG 有功功率和无功功率极限的约束以及节点电压和线路电流的约束。

1) 网络潮流约束

风电场中节点电压和注入功率表达式^[23]为

$$\begin{cases} P_i = U_i \sum_{j=1}^n U_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) \\ Q_i = U_i \sum_{j=1}^n U_j (G_{ij} \sin \delta_{ij} + B_{ij} \cos \delta_{ij}) \\ \delta_{ij} = \delta_i - \delta_j \end{cases} \quad (7)$$

式中： n 是风电场中节点个数； P_i 和 Q_i 分别为节点 i 注入的有功功率和无功功率； U_i 和 δ_i 分别为节点 i 的幅值和相位角； U_j 和 δ_j 分别为节点 j 的幅值和相位角； G_{ij} 和 B_{ij} 分别为节点导纳矩阵的实部和虚部。将风电场和系统模型结合，通过潮流计算进行迭代。

2) 电压约束

$$\underline{v}_j \leq v_j \leq \bar{v}_j \quad (8)$$

式中， \bar{v}_j 和 \underline{v}_j 分别为节点 j 电压幅值的上下限。

3) 电流约束

$$0 \leq I_{i,j} \leq I_{ij} \quad \forall (i,j) \in \varepsilon \quad (9)$$

式中： I_{ij} 为线路 (i,j) 上电流幅值的上限；集合 ε 为风电场内所有支路的集合。

4) DFIG 有功功率约束

$$p_{G,j,\min} \leq p_{G,j} \leq p_{G,j,\max} \quad (10)$$

式中： $p_{G,j,\max}$ 和 $p_{G,j,\min}$ 分别为节点 j 的 DFIG 输出有功功率 $p_{G,j}$ 的上下限，它受风速 v 、风能捕获系数 C_p 和转差率 s 的影响。

5) DFIG 无功功率约束

$$q_{G,j,\min} \leq q_{G,j} \leq q_{G,j,\max} \quad (11)$$

式中， $q_{G,j,\max}$ 和 $q_{G,j,\min}$ 分别为节点 j 的 DFIG 输出无功功率 $q_{G,j}$ 的上下限。由第 1 节可知，DFIG 输出的无功功率受 DFIG 有功功率和机端电压波动影响，无功功率极限随 DFIG 输出有功功率的增加而减小。在基于有功功率预测数据计算风电场无功功率的模型中，可以取 DFIG 有功功率预测上界计算得到对应的无功功率可调范围。

6) SVG 无功功率约束

$$S_{j,\min} \leq q_{S,j} \leq S_{j,\max} \quad (12)$$

式中， $S_{j,\max}$ 和 $S_{j,\min}$ 分别为节点 j 的 SVG 输出无功功率 $q_{S,j}$ 的上下限。

7) 并联电容器组无功容量约束

$$q_{C,j} = n q_{C,0} \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad (13)$$

式中： $q_{C,j}$ 为节点 j 并联可投切电容器的无功容量； $q_{C,0}$ 为单组可投切电容器无功容量； n 为投入电容器组数。

8) OLTC 约束

$$\begin{cases} v_j = t_{ij} v_i \\ t_{ij} \in (T_{ij,1}, T_{ij,2}, \dots, T_{ij,k_T}) \end{cases} \quad (14)$$

式中： t_{ij} 为支路 (i,j) 的变压器分接头变比；OLTC 分接头有 k_T 档，分别为 $T_{ij,1}, T_{ij,2}, \dots, T_{ij,k_T}$ 。

2.5 模型求解

第一阶段，采集风电场数据建立潮流计算模型，风电场无功容量由有载调压变压器分接头档位、并联电容器投切组数和风电机组输出无功容量等决策变量贡献，更新决策变量以求得风电场最大无功容量及相应风电场无功补偿装置的优化配置。在 $u_k = u_{k+1}$ 决策变量的更新过程中，只要决策变量中

有一项无功补偿配置与之前不同, 就算作一组新的决策变量。风电场无功容量的计算, 并非将各项决策变量提供的无功功率作简单叠加, 而是计算风电场输送到电网系统的无功功率。第二阶段, 考虑外界风速波动引起 DFIG 有功功率、无功功率极限变化和风电场并网点电压波动等不确定情形, 在校验约束条件限制下, 第一阶段求解得到的风电场无功容量上下界是否仍能达到。

3 风电场无功电压控制策略

风电场风电机组是良好的无功源, 可以为系统提供动态无功补偿容量而不额外增加成本, 因此在制定控制策略时, 充分挖掘风电机组的无功潜力具有较大的价值。本节基于风电场 AVC 控制系统, 考虑单台机组无功潜力挖掘、风电场稳定经济运行等控制目标, 同时考虑 DFIG 和其他无功补偿设备协调配合, 提出风电场内无功功率指令的分配策略, 建立风电场无功电压控制模型, 并利用优化算法进行求解。

3.1 目标函数

1) 风电场参与电网无功调压, 风电机组距离并网点越远, 线路电压降越大, 节点电压越高, 首先要保证并网点电压和风电场内各节点电压满足要求, 以风电场各节点电压偏差最小为目标制定函数 $g_1(x)$ 。

$$\min g_1(x) = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (U_i - 1)^2} \quad (15)$$

式中: n 表示风电场的节点编号; U_i 表示编号为 i 的节点的电压。

2) 考虑风电场的运行经济性, 风电机组距离并网点越远, 由于线路长、阻抗大, 传输相同有功功率造成的有功损耗越大, 要减小风电场内设备和线路的有功网损, 以风电场总有功网损 P_{loss} 最小为目标制定函数 $g_2(x)$ 。

$$\min g_2(x) = P_{\text{loss}} \quad (16)$$

3) 考虑挖掘风电场单机无功潜力, 如果把风电场无功指令平均分配到各台具有无功调节能力的风机, 容易导致无功潜力小的风机满载, 而无功潜力大的风机无功容量得不到充分利用, 因此要让各台风电机组按照其无功裕度提供无功支撑, 制定函数 $g_3(x)$ 来衡量风电机组无功潜力利用情况, $g_3(x)$ 越小, 表示各台风电机组无功裕度利用率越高。

$$\min g_3(x) = \sum_{i=1}^n \left(\frac{Q_{ii}}{Q_i} - \frac{Q_i}{Q_{\text{ref}}} \right) \quad (17)$$

式中: Q_{ii} 表示第 i 台风电机组的无功裕度; Q_i 表示风电场总无功裕度; Q_i 表示第 i 台风电机组实际

发出的无功功率; Q_{ref} 表示调度下发到风电场的总无功需求指令。

以节点电压偏差小、场站有功网损小和单机无功裕度利用充分作为目标函数, 构建多目标函数如下:

$$\min g(x) = \alpha g_1(x) + \beta g_2(x) + \gamma g_3(x) \quad (18)$$

权衡三类目标的重要性, 利用粒子群算法求解多目标函数, 得到分配给单机的无功指令。多目标函数中的权重系数, 可以根据风电场现场实际需要进行调整, 从而得到合适的控制方案。

3.2 优化算法求解流程

工程应用中, 风电场电压控制策略的制定要满足运算速度快、控制灵活的要求, 而粒子群算法具有收敛速度快和设置参数少的优点, 因此选用粒子群算法求解本文的多目标优化问题。粒子群算法在每次求解迭代中, 都可以从粒子群中寻得一个最优解, 作为个体最优值, 然后记录该个体最优值。更新各个粒子的速度和位置, 进行多次迭代, 可得到不同的个体最优值, 从中挑选最优结果作为全局最优值, 直至迭代到满足结束条件, 即可获得粒子群最优解。本文利用粒子群算法求解风电场控制模型中多目标优化问题的流程如下:

1) 根据风电场各机组有功出力计算其无功裕度, 获得风电机组无功出力的上下限, 同时设定变压器分接头和电容器投入组数的上下限, 并确定风电场总无功需求。

2) 开始迭代, 在粒子运行范围内, 对粒子群的位置和速度进行随机初始化, 包括单台机组无功出力、变压器分接头变比和电容器投入组数。

3) 将风电机组出力、变压器分接头变比和电容器投入组数的初始化结果, 同步到潮流计算系统中运行, 并将节点电压和有功网损等潮流运算结果记录下来, 反馈到粒子群算法主程序。

4) 式(18)作为多目标函数, 根据潮流计算结果, 计算本次迭代中所有粒子的适应值。

5) 寻找多目标最小的粒子, 记录粒子位置, 并更新粒子个体的历史最优位置以及粒子群体的历史最优位置。

6) 更新粒子的速度和位置, 继续进行迭代, 重复第 2) 步, 直到达到终止条件。

4 仿真验证

4.1 场站模型搭建

为了验证本文所提方法的有效性, 通过 Matlab/Simulink 构建风电场并网模型进行仿真验

证, 算例系统如图 3 所示。其中电网部分采用两机四节点算例系统, 风电场系统中共有 9 台参数相同的双馈风电机组, 在节点 W4 并入电网。节点 W1 和节点 W4 间为两组变压器, 变压器 T1 为有载调压变压器, 变比调节范围为 $\pm 5 \times 1\%$ 。在变压器 T1 低压侧(110 kV)有一台容量为 4 Mvar 的 SVG, 在变压器 T2 两侧分别有两组 0.5 Mvar 的可投切电容器。

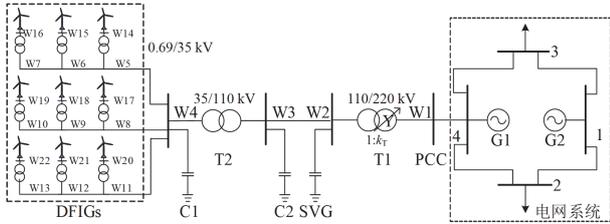


图 3 风电场并网系统

Fig. 3 Wind farm grid-connected system

在风电场建模和潮流计算中^[24], 对风电机组控制方式和接入节点类型作以下假设。

- 1) 风电场控制方式: 在风电场并网处采用恒电压控制, 根据电压实际值和理论值间的偏差确定需要补偿的无功功率。
- 2) 风电机组控制方式: 为了发挥 DFIG 的无功潜力, DFIG 采用定无功功率控制方式, DFIG 发出的无功在其无功容量极限区间内动态可调。
- 3) 风电机组节点类型: 将 DFIG 接入节点作为 PQ 节点, DFIG 根据负载需求输出有功功率, 根据调度指令发出无功功率。

4.2 风电场的无功容量估计

设定 DFIG 有功功率基值为 1.2 MW, 有功功率波动范围为 ± 0.2 MW, 由此计算得到单台机组输出无功功率范围为 $[-1, 1]$ Mvar, SVG 输出无功功率范围为 $[-2, 2]$ Mvar, 考虑成本问题, SVG 一般不作无功补偿, 仅在紧急故障中投入使用, 并网点的电压幅值上下限设置为 $[0.99, 1.01]$ p.u., 风电场并网无功功率的上下限设置为 $[-100, 100]$ Mvar。

按照第 2 节的方法, 求解得到双馈风电场向电网提供的无功容量上下界 Q_{\max} 和 Q_{\min} , 无功功率区间为 $[-9.3296, 8.7826]$ Mvar, 负号表示风电场向电网发出无功功率, 模型运算结果见表 1。

表 1 模型运算结果

Table 1 Model calculation result

	运行时间/s	OLTC 档位	电容器组配置	并网点电压/p.u.
Q_{\max}	11.5731	0.95	[1,1]	1.01
Q_{\min}	11.0201	1.05	[0,0]	1.01

从表 1 中可见: (1) 通过两阶段容量评估方法计算得到的风电场无功容量, 满足网络潮流计算的所

有约束条件, 具有较高的置信度; (2) 经实际案例测试, 算法可以有效收敛, 单次计算所用时间不超过 12 s, 可以满足实时调度^[25]的需求。将两阶段容量评估方法求解结果与简单线性叠加模型求解结果对比, 如表 2 所示。

方法 1: 采用文献[4]中的方法, 将 DFIG、SVG 和电容器的无功容量作简单叠加, 但是这样并不能考虑到不确定性和网络潮流约束。

方法 2: 采用本文方法, 同时考虑不确定性、网络约束和离散变量。

表 2 两种方法结果对比

Table 2 Comparison of the results of the two methods

方法	$[q_p, \bar{q}_p]'$ Mvar	$(\bar{q}_p - q_p)'$ Mvar	电容/ Mvar	OLTC 变比
方法 1	$[-11, 13]$	24	[1,1],[0,0]	
方法 2	$[-9.33, 8.78]$	18.1	[1,1],[0,0]	0.95, 1.05

从对比结果可知, 本文所提方法得到的无功支撑范围小, 这是因为两阶段容量评估方法考虑了包括 DFIG 有功功率在内的不确定性及网络约束、线路容量和电压幅值等因素的影响。直接叠加法求得的无功支撑范围, 部分无功功率值可能在实际中无法获得。因此, 本文所提方法求得的估计结果具有更高的可信度。

4.3 不同控制策略的控制效果比较

对于风电场总无功需求的优化分配, 出于不同的控制目标, 除 3.1 节构建的模型以外, 还构建模型 1、模型 2 做对比分析, 下面分别说明其控制方法。

模型 1: 以节点电压偏差和场站有功网损作为目标函数构建多目标函数, 通过粒子群算法求解。

$$\min g(x) = \alpha g_1(x) + \beta g_2(x) \quad (19)$$

模型 2: 将风电场接收的总无功指令, 依照各台风电机组无功裕度大小, 按比例将无功指令分配到各台机组, 根据机组无功裕度调整无功指令, 让当前无功容量大的风电机组多发无功, 充分利用单台机组的电压调节能力以减轻并网点电压波动, 第 i 台机组发出无功的指令为

$$Q_i = \frac{Q_{li}}{Q} \times Q_{\text{ref}} \quad (20)$$

模型 3: 根据式(18)中各目标函数在工程现场中的重要性, 确定其权重系数, 风电场有功网损和节点电压偏差占比为 30%, 风机无功潜力利用重要程度占比最高为 40%, 权重系数取 $\alpha = \beta = 0.3$ 、 $\gamma = 0.4$ 。

当调度发出一个在风电场无功容量调节范围内的无功指令时, 风电场根据控制策略计算分发到各

无功补偿设备的无功指令。以图 3 所示的风电场并网系统作为算例, 当电网系统出现 7 Mvar 的无功缺额时, 对比不同控制模型下无功补偿设备的出力情况及控制效果, 如表 3 所示。

表 3 不同控制策略下的无功设备出力情况及控制效果对比

参数	无功补偿设备配置情况			
	模型 1	模型 2	模型 3	
DFIG 无功出力/Mvar	1	0.10	0.98	0.69
	2	0.48	0.93	0.62
	3	0.21	0.87	0.48
	4	1.05	0.87	0.58
	5	0.99	0.87	0.56
	6	0.26	0.78	0.53
	7	0.57	0.69	0.57
	8	0.35	0.58	0.39
	9	0.49	0.43	0.28
OLTC 变比	[1,1.05]	[1,1]	[1,1.03]	
电容器容量/Mvar	[1,1]	[0,0]	[0.5,1]	
电压偏差方均根	0.015	0.076	0.022	
有功网损之和/MW	0.032	0.314	0.043	
DFIG 无功裕度平均利用率/%	49.78	77.43	59.99	

由仿真结果可以看出, 模型 1 以网损和电压偏差为控制目标, 给 DFIG 以外的无功补偿设备分发了无功指令, 导致 DFIG 的无功裕度没有得到充分利用; 模型 2 将无功任务全部分配给 DFIG, 充分利用单台风电机组的无功输出能力, 但造成了风电场风电机组容量负载偏高以及节点电压偏高; 模型 3 在前两个模型间做权衡, 提高风电机组无功裕度利用率的同时, 考虑了风电场内部的潮流运行, 风电场网损和电压偏差虽略有增大, 但是都在允许范围内。

5 结论

本文从工程应用的角度出发, 提出双馈风电场两阶段无功容量评估方法, 并基于风电场无功容量评估结果制定无功控制策略。传统的简单叠加模型只能考虑风电场的动态无功容量, 本文则综合考虑了双馈风电机组、SVG、电容器组和有载调压变压器的无功补偿效果。在求得风电场容量的基础上, 综合考虑网络潮流和设备容量约束, 得到风电场无功支撑范围和电压控制策略, 在运行时间和风电场无功容量区间的置信程度两个方面, 均能满足工程应用要求。在风电场 AVC 控制系统实际运行中, 调度每隔 15 min 给风电场下发一次无功电压指令, 然后再由风电场把无功指令分发给各无功补偿设备。

未来将进一步精细风电机组内部结构, 研究风电场无功电压控制的暂态过程, 结合风电场并网导则中对风电机组高低压穿越的要求, 探索适合应用于实际电网的风电场暂态、稳态无功电压控制策略。

参考文献

- [1] 何欣, 钟诚, 拜润卿, 等. 基于修改功率跟踪特性曲线的风电机组减载调频策略研究[J]. 智慧电力, 2021, 49(8): 39-45.
HE Xin, ZHONG Cheng, BAI Runqing, et al. Load reduction frequency modulation strategy of wind turbine based on modifying power tracking characteristic curve[J]. Smart Power, 2021, 49(8): 39-45.
- [2] 张哲, 王成福, 董晓明, 等. 基于分层模型预测控制的风电场电压协调控制策略[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(11): 34-42.
ZHANG Zhe, WANG Chengfu, DONG Xiaoming, et al. Coordinated voltage control strategy of wind farms based on hierarchical model predictive control[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(11): 34-42.
- [3] 刘辉, 陈璨, 巨云涛, 等. 风电汇集地区电压不平衡特性分析及抑制策略[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(14): 132-139.
LIU Hui, CHEN Can, JU Yuntao, et al. Characteristics analysis and suppression strategy of voltage unbalance in areas with integration of wind power[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(14): 132-139.
- [4] 中国国家标准化管理委员会. 风电场接入电力系统技术规定: GB/T 19963—2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.
- [5] 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[J]. 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[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(9): 77-82.
- [6] LOPEZ J, GUBIA E, OLEA E, et al. Ride through of wind turbines with doubly fed induction generator under symmetrical voltage dips[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, 56(10): 4246-4254.
- [7] 沈阳武, 祖文静, 梁利清, 等. 基于组合赋权法的风电场无功电压控制能力综合评估[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(14): 18-24.
SHEN Yangwu, ZU Wenjing, LIANG Liqing, et al. Comprehensive evaluation of the reactive power and voltage control capability of a wind farm based on a combined weighting method[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(14): 18-24.
- [8] 徐钢, 吴熙, 范子恺, 等. 基于关联分析的光伏电站无

- 功控制能力评估[J]. 电测与仪表, 2017, 54(12): 83-90.
- XU Gang, WU Xi, FAN Zikai, et al. Relation analysis-based synthetic evaluation of reactive power control ability for photovoltaic power stations[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2017, 54(12): 83-90.
- [9] 彭华, 王文超, 朱永利, 等. 基于 LSTM 神经网络的风电场集电线路单相接地智能测距[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(16): 60-66.
- PENG Hua, WANG Wenchao, ZHU Yongli, et al. An intelligent single-phase grounding fault location for a wind farm collection line based on an LSTM neural network[J]. *Power System Protection and Control*, 2021, 49(16): 60-66.
- [10] LI Yujun, XU Zhao, ZHANG Jianliang, et al. Variable droop voltage control for wind farm[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2018, 9(1): 491-493.
- [11] 崔挺, 李雪萍, 颜畅, 等. 基于模型预测控制的风电场故障穿越有功无功优化控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(2): 12-20.
- CUI Ting, LI Xueping, YAN Chang, et al. Active and reactive power optimization control strategy for wind farm fault ride-through based on model predictive control[J]. *Power System Protection and Control*, 2022, 50(2): 12-20.
- [12] 赖福兴. 风电场无功功率容量动态评估方法研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2020.
- LAI Fuxing. Dynamic assessment method for reactive power of wind farm[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2020.
- [13] ANJALIAH K, DASH PK, SAHANI M. A new protection scheme for PV-wind based DC-ring microgrid by using modified multifractal detrended fluctuation analysis[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2022, 7(1): 100-123.
- [14] 唐挺. 风速波动下基于无功容量提升的双馈风电系统电压控制方法[D]. 重庆: 重庆大学, 2019.
- TANG Ting. Voltage control method of wind power system based on reactive power capacity improvement of DFIG under wind speed variations[D]. Chongqing: Chongqing University, 2019.
- [15] KIM J, SEOK J K, MULJADI E, et al. Adaptive Q-V scheme for the voltage control of a DFIG-based wind power plant[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2016, 31(5): 3586-3599.
- [16] KIM J, MULJADI E, PARK J W, et al. Flexible IQ-V scheme of a DFIG for rapid voltage regulation of a wind power plant[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2017, 64(11): 8832-8842.
- [17] 郝嘉诚. 风电场无功电压协调控制策略[D]. 北京: 华北电力大学, 2019.
- HAO Jiacheng. Coordinated strategy for reactive power and voltage control in wind farm[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2019.
- [18] 张晓朝, 段建东, 石祥宇, 等. 利用 DFIG 无功能力的分散式风电并网有功最大控制策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(7): 2001-2009.
- ZHANG Xiaozhao, DUAN Jiandong, SHI Xiangyu, et al. Research of maximum control strategy with dispersed wind power considering reactive capability of DFIG[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2017, 37(7): 2001-2009.
- [19] 徐衍会, 耿雨柔, 杨博文. 风电场引发火电机次同步振荡的机理及影响因素研究[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(18): 1-9.
- XU Yanhui, GENG Yurou, YANG Bowen. Study on the mechanism and influencing factors of subsynchronous oscillations induced by wind farms in a fossil fuel power plant[J]. *Power System Protection and Control*, 2021, 49(18): 1-9.
- [20] 周瑜, 李正烁. 双馈风力发电场无功支撑范围的鲁棒估计[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(5): 1-15.
- ZHOU Yu, LI Zhengshuo. Robust estimation of reactive power support range of DFIG wind farm[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2021, 45(5): 1-15.
- [21] KAROUI R, BACHA F, HASNI A, et al. Analysis of the repowering wind farm of sidi-daoud in Tunisia[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2019, 55(3): 3011-3023.
- [22] 阿马里斯, 阿朗索, 奥尔特加温春雪, 等. 风力发电并网运行的无功管理[M]. 北京: 机械工业出版社, 2014.
- [23] 吴义纯, 丁明, 张立军. 含风电场的电力系统潮流计算[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(4): 38-41.
- WU Yichun, DING Ming, ZHANG Lijun. Power flow analysis in electrical power networks including wind farms[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2005, 25(4): 38-41.
- [24] ZIMMERMAN R D, MURILLO-SÁNCHEZ C E, THOMAS R J. MATPOWER: steady-state operations, planning, and analysis tools for power systems research and education[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2011, 26(1): 12-19.
- [25] 国家能源局. 风电功率预测系统功能规范: NB/T 31046—2013[S]. 北京: 中国标准出版社, 2013.

收稿日期: 2022-03-24; 修回日期: 2022-07-11

作者简介:

王耀翔(1997—), 男, 硕士研究生, 研究方向为风电场无功电压控制; E-mail: 2508995507@qq.com

胥国毅(1980—), 男, 通信作者, 博士, 高级工程师, 研究方向为新能源电力系统建模和新能源电力系统并网分析与控制. E-mail: xu_gy@ncepu.edu.cn

(编辑 许威)