

基于等值双馈风电场协同静止无功发生器的 电网电压波动抑制策略

夏楠¹, 王艺华², 张阳², 党超亮^{2,3}, 段建东², 同向前²

(1. 国网陕西省电力有限公司电力科学研究院, 陕西省西安市 710100; 2. 西安理工大学电气工程学院, 陕西省西安市 710048; 3. 西安交通大学电力设备电气绝缘国家重点实验室, 陕西省西安市 710049)

Voltage Fluctuation Suppression Strategy for Power Grid based on Equivalent Doubly Fed Wind Farm Cooperative Static Var Generator

XIA Nan¹, WANG Yihua², ZHANG Yang², DANG Chaoliang^{2,3}, DUAN Jiandong², TONG Xiangqian²

(1. Power Research Institute of State Grid Shaanxi Electric Power Company Limited, Xi'an 710100, Shaanxi Province, China; 2. School of Electrical Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, Shaanxi Province, China; 3. State Key Laboratory of Electrical Insulation for Electric Equipment of Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, Shaanxi Province, China)

摘要: 针对双馈风电机组并网后电网电压波动、传统模拟分析方法建模计算量大且频率耦合关系复杂的问题, 提出一种基于等值双馈风电场协同静止无功发生器 (static var generator, SVG) 的电网电压稳定协同控制方法。首先, 根据风电场功率特性的聚类现象提出基于 K-means 聚类的 2 步等值建模方法, 分析明确了双馈感应电机 (double-fed induction generator, DFIG) 内定子侧和网侧变流器的最大无功补偿能力。其次, 针对电网扰动情况下 SVG 对风电场并网点电压的支撑能力不足的问题, 提出一种面向不同电压波动等级的 DFIG 协同 SVG 电网电压波动抑制策略, 充分利用风电场站内部 DFIG 的自身无功储备, 并在电压恢复过程中加入延时环节确保电压稳定。最后, 通过仿真验证了所提协同控制策略对于改善风电场并网点电压波动的有效性。

关键词: 等值风电场; SVG; 电压波动; 协同控制

Abstract: In allusion to the problems of grid voltage fluctuation after a grid-connected doubly-fed wind turbine, a large amount of the modeling calculation, and the complex frequency coupling relationship of traditional simulation analysis method, a grid voltage stability cooperative control method based on equivalent doubly-fed wind farm cooperative static reactive power generator (abbr. SVG) was proposed. Firstly, a two-step equivalent modeling method based on K-means clustering was proposed according to the clustering phenomenon of wind farm power characteristics, and the maximum reactive power compensation capabilities of stator side and grid side converters in double-fed induction generators (abbr. DFIG) were analyzed and defined. Secondly, to address the issue of in-

sufficient support capability of SVG to the voltage at wind farm connecting points in the case of a power grid disturbance, a DFIG collaborative SVG power grid voltage fluctuation suppression strategy for different voltage fluctuation levels, which makes full use of the reactive power reserve of DFIG inside the wind farm station, and adds a delay link in the voltage recovery process to ensure voltage stability, was proposed. Finally, the effectiveness of the proposed collaborative control strategy in improving the voltage fluctuation at the wind farm connecting points was verified through simulation.

Keywords: equivalent wind farm; SVG; voltage fluctuation; cooperative control

DOI: 10.19725/j.cnki.1007-2322.2022.0444

0 引言

大力发展可再生能源, 提高新能源在一次能源中的比重, 作为推动我国能源结构调整的主要途径, 对于构建国家能源安全战略具有重要意义^[1]。其中, 风力发电凭借其资源丰富、清洁环保、成本相对低廉的优点, 发展迅猛。然而, 在对风电场进行模拟分析时, 若每台机组均采用实际详细模型, 则会造成建模计算量大, 频率耦合关系复杂的问题, 甚至造成‘维数灾’的发生^[2]。因此, 有必要建立具有相同外特性的风电场等值模型。此外, 风能的随机性和波动性会影响风电场并网输出功率, 造成并网点电压波动, 严重降低电网电能质量^[3]。为实现风电机组的稳定并网, 通常

需要配备一定容量的静止无功发生器 (static var generator, SVG) 用以支撑并网电压, 同时抑制低频振荡。因此, 为弥补无功变化引起的风电场并网点电压不稳的现象, 研究外部无功补偿设备与风电场协同稳压问题具有重要意义。

目前稳定并网点电压的方法主要为仅 SVG 或者双馈感应电机 (double-fed induction generator, DFIG) 调压。然而, 仅 SVG 调压不能充分利用 DFIG 自身的无功功率储备, 且对 SVG 的无功配置容量需求较高; 采用仅 DFIG 调压时又存在响应速度慢和易受风电场运行情况干扰的缺点, 因此, 如何根据电网电压不同波动情况对两者进行合理地控制切换, 既能充分利用 SVG 快速响应的优势, 又能将 DFIG 自身的无功储备运用到电网调压中, 使 DFIG 协同 SVG 支撑并网点电压具有重要的研究意义。其中, 文献 [4-5] 分析了 DFIG 自身无功调节机理以及发出无功范围, 阐述了提升机组无功出力的控制策略; 文献 [6] 只考虑风机内部转子侧和网侧变流器的控制任务分配问题, 但当电网发生严重故障时, 仅 DFIG 无法提供足够的无功需求; 文献 [7-8] 仅运用 SVG 自身的无功功率对电网电压进行动态支撑, 未合理利用 DFIG 自身的无功储备, 导致系统对 SVG 的无功容量配置要求过大、装置成本过高; 文献 [9-10] 结合风电场内 DFIG 自身特点, 详细分析了 SVG 设备在无功控制时的容量和详细参数等, 为后续参数选取提供支撑; 文献 [11-13] 研究了 DFIG 与 SVG 共同进行电压支撑, 根据并网点电压实时偏差计算系统无功缺额, 利用了风电场自身的电压调节能力, 但将 SVG 作为电压支撑中的无功储备导致系统响应速度较慢; 文献 [14] 表明, 在轻微电压降落情况下, DFIG 变流器在提升电压稳定性方面具有明显优势; 文献 [15] 采用微型电网对 SVG 与风电机组协同控制方法进行分析, 为资源互补提供理论条件。

综合上述文献分析可以看到, 目前现有方法侧重于单 DFIG 或者 SVG 的电网电压调控能力, 但当遭受扰动时, 这种控制方法对并网点电压的支撑能力非常有限, 且对于 DFIG 内部定子侧和网侧变流器的最大补偿无功输出能力尚不明确。针对上述问题, 本文提出一种基于等值双馈风电场协同 SVG 的电压稳定协调控制方法。首先, 针对新能源汇集区域风电场功率特性, 提出了一

种基于 k-means 聚类的两步等值建模方法。其次, 分析了并网点电压波动期间定子侧和网侧变流器的最大无功补偿能力, 进一步提出了一种基于 DFIG 与 SVG 的电网电压协同控制方案, 根据实时检测电压分类情况采取不同的协同控制方法。最后, 以陕武直流某风电场数据为例对本文控制策略进行验证, 结果充分表明所提策略的有效性和正确性。

1 基于 k-means 的风电场聚类指标划分

如图 1 所示, 中型风电场中风机数量一般为几十台甚至上百台, 采用详细风电场模型仿真分析时较复杂。风电场等值建模指的是依据某种相似的特征量或原则对场内多台风机进行等值分类。将原来的几十台风机合理划分成等值为单台或者多台机组。可避免采用详细风电场模型仿真耗费大量时间的问题, 本文选择根据场内风机的功率是否具备集群特性进行初步聚类, 为进一步降低等值误差, 采用基于 K-means 算法的两步聚类法对风电场进行等值建模。

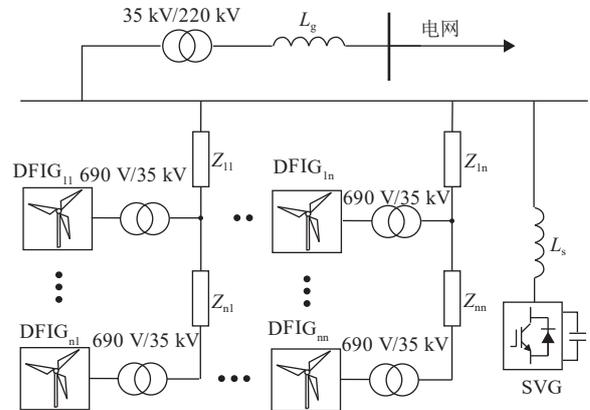


图 1 风电场拓扑结构图

Fig. 1 Topological structure diagram of wind farm

1.1 风电场功率特性分析

考虑到实际风电场中不同风机之间位置距离较远, 故不能忽略集电线路中所产生的电压损耗。稳态运行时的各台风机由于所感受到的风速不同, 其有功功率、无功功率及并网点电压都各有差别。在低电压穿越期间, DFIG 依据功率外环所给定的功率参考值可实现特定功率输出, 《风电场接入电力系统技术规定》要求在并网点故障期间风电场应具备相应的动态无功支撑能力, 根据电压

故障程度的不同情况，计算相应的 d, q 轴分量，来提供相应的动态无功电流。忽略磁饱和影响可得有功和无功功率的计算公式

$$\begin{cases} P_s = -u_{sd}i_{sd} - u_{sq}i_{sq} \\ Q_s = -u_{sq}i_{sd} + u_{sd}i_{sq} \end{cases} \quad (1)$$

在风机切换至故障运行控制方式时，输出的有功功率和无功功率为

$$\begin{cases} P_{\text{fault}} = \min\left(P_0, \frac{(1-s)U_t L_m}{L_s} \sqrt{I_{\text{RSC,lim}} - (i_{rd}^*)^2}\right) \\ Q_{\text{fault}} = K_1 \times (0.9 - U_t) \times U_t \end{cases} \quad (2)$$

式中： P_0 为风机故障前稳态有功功率； $I_{\text{RSC,lim}}$ 为转子侧变流器的限幅值； s 为风机转差率； U_t 为并网点电压标幺值； L_m 为励磁电感； L_s 为定子侧电感值； i_{rd}^* 为转子电流 d 轴分量参考值； K_1 为风电场动态无功电流比例系数； U_t 为并网点电压标幺值。

DFIG 从流向叶片的风能中吸收功率转换成输出机械功率，根据 Betz 理论，输入风速与机械功率之间可表示为

$$P_m = \frac{1}{2} \rho C_p(\lambda, \beta) A V^3 \quad (3)$$

式中： P_m 为输出机械功率； ρ 为空气密度； A 为叶片扫风面积； V 为实时风速； λ 为叶尖速率比， β 为桨距角。

稳态有功功率与各台风机的输入风速有关，同时与转差率 s 线性相关，本文将不同区间内风机风速划分为启动区（3~7 m/s）和最大功率跟踪区（7~25 m/s）。以某典型中等规模的风电场中 30 台双馈机组为例。如图 2 所示，对于输入风速属于启动区内的各台机组，故障期间无功功率具有明显集群特性；以此将群内风机初步分为类别 1 和类别 2。根据实际风电场数据可得，处于最大功率跟踪区内风机一般多于启动区内风机数量^[16]。类别 2 中风机功率特性相似的风机数量过多，需进行再次聚类以减少等值误差。

1.2 基于三维 k-means 聚类的等值风电场参数计算

k-means 算法是一种基于欧氏距离的聚类方法，基本思想是以空间中给定的 k 个点为中心进行聚类，然后计算各个数据对象到聚类中心点的距离，把数据对象划分至距离其最近的聚类中心所在簇中。同一簇中的数据对象相似度最大，不同簇中的相似度最小，具体步骤如下：

步骤 1：从样本集 $D = \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_m\}$ 中随机选

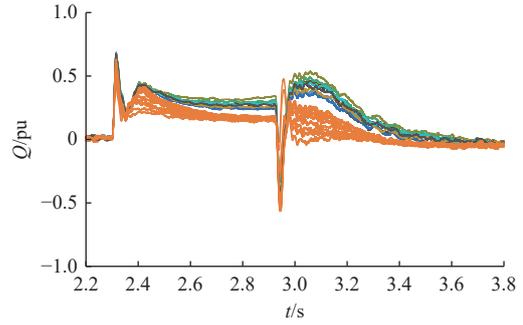


图 2 并网点电压跌落下无功功率响应曲线
Fig. 2 Reactive power response curves under voltage drop at connecting point

择 k 个样本作为初始均值向量 $\{\mu_1, \mu_2, \mu_3, \dots, \mu_k\}$ 。

步骤 2：计算各样本 $x_j (1 \leq j \leq m)$ 与各均值向量 $\mu_i (1 \leq i \leq k)$ 的距离 d_{ji} ，根据距离最近的均值向量确定样本 x_j 的簇标记 λ_j 。

$$d_{ji} = \|x_j - \mu_i\|_2 \quad (4)$$

$$\lambda_j = \arg \min_{i \in \{1, 2, 3, \dots, k\}} d_{ji} \quad (5)$$

步骤 3：根据簇标记将样本 x_j 划入相应的簇： $C_{\lambda_j} = C_{\lambda_j} \cup (x_j)$ 。

步骤 4：计算新的均值向量 μ_i' ，并重复计算步骤 2 和步骤 3，直至当前均值向量未更新，最终得到 k 类聚类结果。

在风电机组再次聚类过程中，以可表征不同风机特性差异的实测风速 V 、有功功率 P 和转差率 s 三者共同作为表征机组特性差异的物理量，即 $x_j = [V_j, P_j, s_j]$ 。故 K-means 聚类中的输入数据是长度为 m 的三维数组集合。

对前节中类别 2 的风机再次进行聚类，最终可得到风电场中 30 台风机的聚类结果为 16、8 和 6 台。故可用三台机来表征风电场的动态物理特性，且仿真时间较短、精度较高，等值的风电场如图 3 所示。

在通过上述步骤实现风电场聚类分群后，等值模型中发电机容量、惯性时间常数和刚度系数为各自群内全部风机原有之和；发电机电压方程、状态方程和控制系统均与群内单台机保持一致，集电网络参数等值采用损耗相等原则进行计算。

$$Z_{\text{eq}} = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta S_i}{\left(\left(\sum_{i=1}^n S_i + \sum_{i=1}^n \Delta S_i \right) / V_{\text{pcc}} \right)^2} \quad (6)$$

转子侧和网侧的功率平衡。在 dq 坐标系中网侧变流器采用电网电压定向矢量控制的数学模型如下

$$\begin{cases} u_{gd} = R_g i_{gd} + L_g \frac{di_{gd}}{dt} - \omega_s L_g i_{gq} + v_{gd} \\ u_{gq} = R_g i_{gq} + L_g \frac{di_{gq}}{dt} + \omega_s L_g i_{gd} + v_{gq} \end{cases} \quad (13)$$

式中， u_{gd} 和 u_{gq} 是网侧变流器交流侧电压的 dq 轴分量； i_{gd} 和 i_{gq} 是网侧变流器交流侧电流的 dq 轴分量，正方向为电网流向变流器； R_g 和 L_g 是网侧变流器电阻和电感。

变流器输出的电流与电压存在交叉的耦合项以及电网电压的波动影响。为了减小这些误差以便精确地控制，采用线性的比例积分 (proportional-integral, PI) 控制可以实现静态的无差控制。得到网侧变流器输出电压参考值为

$$\begin{cases} u_{gq}^* = -\left(K_p + \frac{K_i}{s}\right)(i_{gq}^* - i_{gq}) - \omega_g L_g i_{gq} - v_{gq} \\ u_{gd}^* = -\left(K_p + \frac{K_i}{s}\right)(i_{gd}^* - i_{gd}) + \omega_g L_g i_{gq} - v_{gd} \end{cases} \quad (14)$$

式中， K_p 和 K_i 为电压控制环比例和积分常数， i_{gq}^* 和 i_{gd}^* 为电流内环控制器的电流指令值。

网侧变流器控制的有功指令、无功指令为：

$$\begin{cases} P_g = \frac{3}{2} u_s i_{gq} \\ Q_g = -\frac{3}{2} u_s i_{gd} \end{cases} \quad (15)$$

由式 (10) 可得，通过调节 i_{gq} 和 i_{gd} ，可以对网侧有功、无功进行独立控制，为减少 DFIG 中的电流和损耗，通常将参考值 Q_{ref} 设置为 0。

2.2 SVG 恒电压控制策略研究

对于 SVG 控制，主要包括直流侧系统母线电压的稳定和 SVG 与等值风电场并网点无功功率交换的能量，本文采用控制精度较高、响应速度较快的直接电流控制方式。构建 SVG 的数学模型，根据物理参数得到 SVG 的电压方程，进一步通过派克变换得到简化的 dq 坐标系下的变量方程。

$$\begin{cases} L_g \frac{di_{gd}}{dt} = -R_g i_{gd} - \omega_1 L_g i_{gq} + u_{gq} - u_{cd} \\ L_g \frac{di_{gq}}{dt} = -R_g i_{gq} + \omega_1 L_g i_{gd} + u_{gd} - u_{cq} \end{cases} \quad (16)$$

式中： L_g 是 SVG 的等值电感， R_g 是 SVG 的等值电阻， ω_1 为电网角频率， i_g 表示 SVG 输出电流， u_g 表示 SVG 输出电压， u_c 为电网侧电压，下标 d 和 q 分别表示派克变换后的 d 轴和 q 轴分量。

采用 dq 旋转坐标系下电流直接控制的 SVG，通过控制其输出的有功电流 i_{gd} 、无功电流 i_{gq} 的大小，便可控制其向电网输出的有功功率、无功功率的大小。SVG 向电网输出的有功功率 P_g 和无功功率 Q_g 可以表示为

$$\begin{cases} P_g = 1.5 \operatorname{Re}(u_{PCCdq} \overline{i_{gdq}}) = 1.5 U_{PCC} i_{gd} \\ Q_g = 1.5 \operatorname{Im}(u_{PCCdq} \overline{i_{gdq}}) = -1.5 U_{PCC} i_{gq} \end{cases} \quad (17)$$

式中 u_{PCCdq} 为 dq 坐标系下并网点电压的值， $\overline{i_{gdq}}$ 为 dq 坐标系下 SVG 输出电流的共轭值。

SVG 恒电压模式的控制方程如式 (18) 所示。

$$\begin{cases} i_d^* = \left(k_{p1} + \frac{k_{i1}}{s}\right) \left[\left((V_{dref} - V_{dc}) \left(k_{p2} + \frac{k_{i2}}{s} \right) - i_d \right) \right] \\ i_q^* = \left(k_{p3} + \frac{k_{i3}}{s}\right) \left[\left((V_{ref} - V) \left(k_{p4} + \frac{k_{i4}}{s} \right) - i_q \right) \right] \end{cases} \quad (18)$$

式中 k_{p1} 和 k_{i1} 为 d 轴电流 PI 调节器的比例和积分增益； k_{p3} 和 k_{i3} 为 q 轴电流 PI 调节器的比例和积分增益； k_{p2} 和 k_{i2} 为 SVG 无功功率 PI 调节器的比例和积分增益； k_{p4} 和 k_{i4} 为 SVG 电压 PI 调节器的比例和积分增益； V_{dref} 和 V_{ref} 分别为 SVG 的直流电压参考值和并网点电压参考值； V_{dc} 和 V 分别为 SVG 的直流电压和并网点电压； i_d^* 和 i_q^* 为整定后 SVG 的输出电流。

2.3 协同控制研究

图 4 为本文所提 DFIG 协同 SVG 电网电压波动抑制策略的控制原理框图。由于 SVG 无功响应速度较快，而 DFIG 无功响应较慢，因此在电网电压波动较小时优先配置响应速度较快的 SVG 支撑电网电压，在充分发挥 SVG 补偿能力的同时也保证风电场具有充足的有功输出；在电网电压波动较大时采用 SVG、双馈风机定子侧和转子侧共同支撑电网电压，保证输出无功总额最大程度支撑电网电压。

如图 5 所示，根据国标 GB/T 36995《风力发电机组故障电压穿越能力测试规程》以及电网正常运行的要求，制定能在各种电压偏差和故障情况下进行电压支撑的协同控制策略。我国标准规定用电设备的允许电压偏差为 0.05 pu，35 kV 供电系统中额定电压容许的偏差为 0.1pu^[18]。然而风力发电相较于传统火力发电存在波动性大，随机性强等缺点，需采取适当措施来提升风电场并网点电压稳定性。当电压幅值在 0.95~1.05 pu 较小范围内时，采用 DFIG 网侧变流器与 SVG 共同

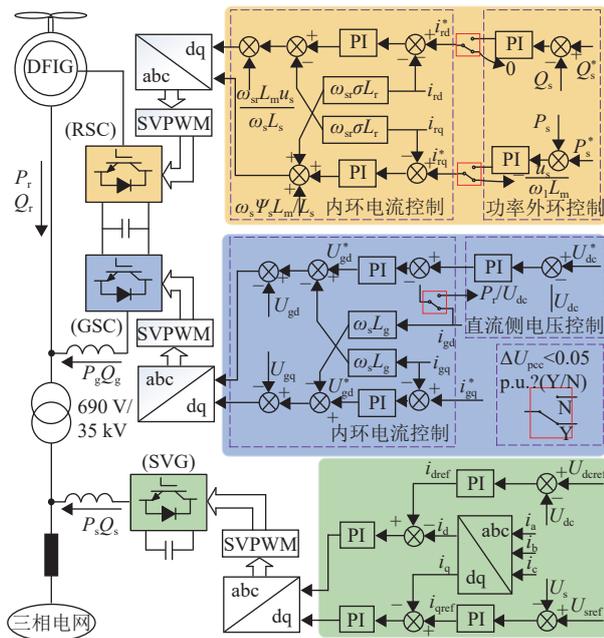


图4 DFIG与SVG协同控制模型

Fig. 4 DFIG and SVG collaborative control model

向系统发出或吸收较少的无功；当电压幅值在0.9~0.95 pu或1.05~1.1 pu范围内时，采用DFIG网侧变流器、定子和SVG共同向系统发出或吸收适量的无功，使并网点电压尽可能快地恢复，减少电压降落对系统带来的不利影响。

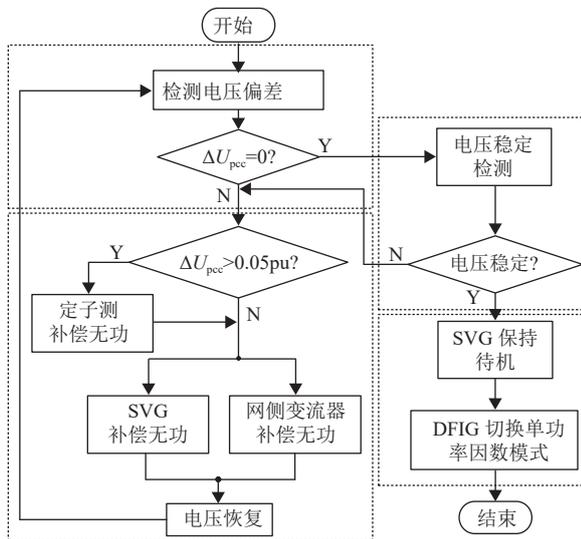


图5 风电场协同控制流程图

Fig. 5 Flowchart of wind farm collaborative control

当电网发生故障导致风电场并网点电压跌落至0.2~0.9 pu区间，或者换流器闭锁引起的无功盈余导致电网电压在1.1~1.3 pu时，机组需向电网注入或吸收无功电流支撑电网电压，此时

SVG协助DFIG完成高低电压穿越过程，防止低电压或过电压导致风机内部电流过大产生安全隐患。

在SVG动作后，若并网点电压未稳定在1 pu，则继续对其进行实时检测并补偿，为避免SVG产生过补偿使得并网点电压超过1 pu进而引起电压状态恢复的误判，故选择当电压幅值在0.1 s延时范围内多次稳定为1 pu情况下，对DFIG采用单功率因数控制策略且此时SVG不动作。

3 仿真测试分析

按照本文所提等值方法的聚类结果结合SVG补偿设备在MATLAB/Simulink平台搭建仿真系统，3台等值DFIG机组通过变压器接入110kV电网，SVG设备接在35kV母线上，将其母线设置为风电场总容量的30%。

为模拟实际风电场中电压偏差情况，本文选择在并网点母线处串接电压跌落器。通过调节短路阻抗 X_p 的性质及大小可以实现不同的故障电压偏差，配合断路器的闭合、断开时间可分别控制故障的发生和消除。在3 s时设置故障使得并网点电压分别至不同的0.96、0.91、0.72和1.23 pu，并在5 s时切除故障，分别仿真没有投入SVG设备，与投入SVG设备协同DFIG控制来调节电压的结果。

图6和图7分别为风速波动等原因导致并网点电压分别降落至0.91 pu和0.96 pu的情况，分别对映较大的扰动和较小的扰动，但电压波动范围还未达到故障的低电压穿越范围内。此时仅依靠DFIG难以维持并网点电压稳定，采用投入的SVG与DFIG协同作用向电网注入无功，能将并网点电压在0.2 s暂态过程后维持在1 pu。

图8所示为输电线路因三相对称故障等情况导致并网点电压跌落至低电压穿越范围内，此时电压为0.72 pu，风电场接入电力系统技术规定要求在对称故障期间风电场应具有动态无功支撑能力，并响应并网点电压变化情况来提供相应的动态无功电流，此时若仅依靠DFIG支撑无功难以满足，故选择SVG与DFIG协同作用。经过0.2 s暂态过程后，并网点电压由0.72 pu恢复至0.89 pu，电压幅值提升了23.6%，较好抑制了低电压穿越期间DFIG内部过电压、过电流等情况。

图9所示为风电场因换流站闭锁引起无功盈

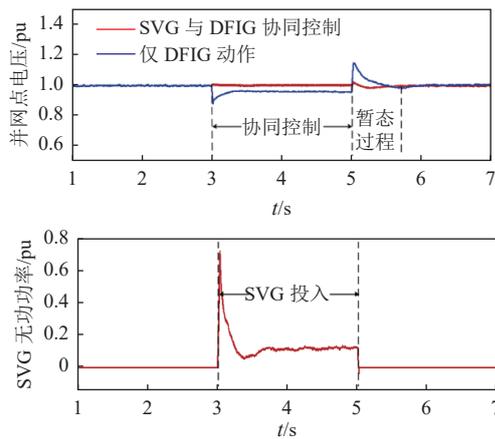


图 6 风电场并网点电压降落至 0.96 pu 时的情况

Fig. 6 Circumstances when voltage at wind farm connecting points drops to 0.96 pu

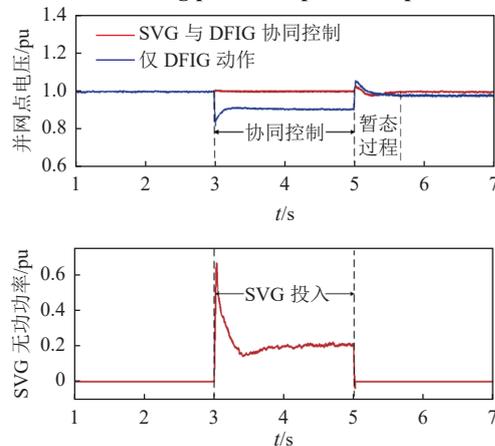


图 7 风电场并网点电压降落至 0.91 pu 时的情况

Fig. 7 Circumstances when voltage at wind farm connecting points drops to 0.91 pu

余等情况导致的并网点电压骤升，DFIG 进入高电压穿越状态。此时并网点电压为 1.23 pu，通过 SVG 与 DFIG 协同控制在 0.3 s 暂态过程后使得并网点电压稳定在 1 pu，电压幅值降低了 23%。此时电压在故障结束后的暂态过程中波动小，响应时间快。

仿真结果表明，风电场在不同故障引起的电压偏差情况下，加装 SVG 补偿设备的风电场并网点电压相比没有 SVG 的风电场并网点电压有较大改善。在 0.9~1 pu 电压范围内，SVG 设备可以将并网点电压维持在 1 pu，并且瞬间响应速度快，能较好地提升电压质量。在属于低电压穿越范围下的 0.72 pu 时，SVG 能快速响应的同时改用定无功功率控制模式，尽可能发最大额度的无功来补偿电网电压，协助电网完成低电压穿越过

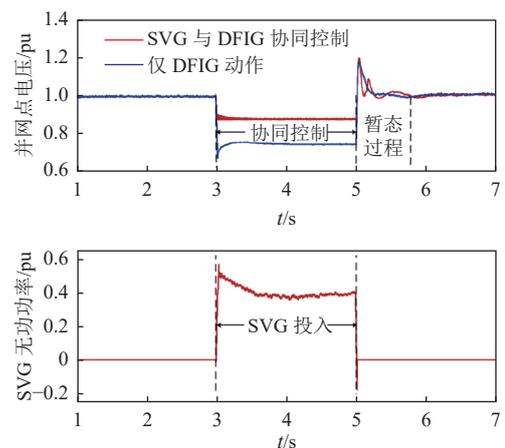


图 8 风电场并网点电压降落至 0.72 pu 时的情况

Fig. 8 Circumstances when voltage at wind farm connecting points drops to 0.72 pu

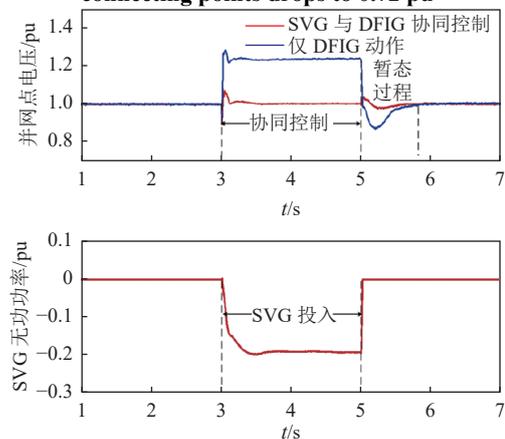


图 9 风电场并网点电压骤升至 1.23 pu 时的情况

Fig. 9 Circumstances when voltage at wind farm connecting points suddenly rises to 1.23 pu

程。在高电压穿越范围内，二者协同控制可以将并网点电压稳定为 1 pu。针对于各种不同故障及扰动，本文所提控制均可提升并网点电压稳定情况。

4 结论

1) 本文运用基于风电场功率特性的 2 步等值方法，构建了表征实际风电场的外特性的精确数学模型，规避了传统模拟分析方法时存在建模计算量大，频率耦合关系复杂的缺点，为分析风电场运行特性提供了一种运算量小、可靠性高的模拟建模方法；

2) 本文明确了 DFIG 内部定子侧和网侧变流器的最大无功输出能力，仿真验证了本文所提协同控制策略不仅在较小电压波动下具有稳定电压的优势，且在协助风电场故障期间进行高、低电

压穿越过程中具有良好的控制效果,能显著提升故障期间并网点电压质量。

致谢

本论文相关工作来自于国网陕西省电力有限公司科技项目支持,项目名称:新能源场站 SVG 半实物仿真及控制策略优化研究(项目编号:5226KY22000F)。

参考文献

- [1] 兰征,刁伟业,涂春鸣,等.含储能和氢燃料电池的孤岛微电网混合运行模式与功率协调策略研究[J].电网技术,2022,46(1):156-164.
LAN Zheng, DIAO Weiye, TU Chunming, *et al.* Study on hybrid operation mode and power coordination strategy of isolated microgrid with energy storage and hydrogen fuel cells[J]. Power System Technology, 2022, 46(1): 156-164 (in Chinese).
- [2] 曲明,丁涛,李立,等.从 NP-Hard 到多项式时间算法的大规模机组组合近似线性规划:双重凸包模型[J].中国电机工程学报,2022,42(9):3261-3276.
QU Ming, DING Tao, LI Li, *et al.* Approximate linear programming for large-scale unit commitment from NP Hard to polynomial time algorithm: double convex hull model[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(9): 3261-3276(in Chinese).
- [3] 吴林林,程浩,刘京波,等.静止无功发生器对双馈风电场高频振荡的影响[J].中国电力,2022,55(9):163-173,182.
WU Linlin, CHENG Hao, LIU Jingbo, *et al.* Influence of static var generator on high-frequency oscillation of doubly fed wind farm[J]. Electric Power, 2022, 55(9): 163-173, 182 (in Chinese).(in Chinese).
- [4] 姜惠兰,王绍辉,李希钰,等.考虑动态电压区间无功支撑的双馈风机连锁故障穿越控制策略[J].高电压技术,2022,48(1):147-155.
JIANG Huilan, WANG Shaohui, LI Xiyu, *et al.* Cascading fault ride through control strategy for doubly fed fan considering dynamic voltage interval reactive power support[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(1): 147-155 (in Chinese).(in Chinese).
- [5] 王玉婷,李鹏.大规模风电并网无功电压协调控制策略研究[J].电工电能新技术,2019,38(3):47-55.
WANG Yuting, LI Peng. Research on coordinated control strategy of reactive power and voltage for large-scale wind power grid connected[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2019, 38(3): 47-55 (in Chinese).(in Chinese).
- [6] NIAN H, CHENG P, ZHU Z Q. Coordinated direct power control of DFIG system without phase-locked loop under unbalanced grid voltage conditions[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 31(4): 2905-2918.
- [7] TOHIDI S, BEHNAM M I. A comprehensive review of low voltage ride-through of doubly fed induction wind generators[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2016, 57 (5) : 412-419.
- [8] LEE T L, HU S H and CHAN Y H, D-STATCOM With Positive-sequence admittance and negative-sequence conductance to mitigate voltage fluctuations in high-level penetration of distributed-generation systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(4): 1417-1428.
- [9] 付文秀,范春菊. SVG 在双馈风力发电系统电压无功控制中的应用[J].电力系统保护与控制,2015,43(3):61-68.
FU Wenxiu, FAN Chunju. Application of SVG in voltage and reactive power control of doubly fed wind power generation system[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(3): 61-68 (in Chinese).(in Chinese).
- [10] 郭强,孙华东,高磊,等.计及风电场随机特性的 SVG 模型参数智能辨识方法研究[J].中国电机工程学报,2020,40(24):7950-7958,8232.
GUO Qiang, SUN Huadong, GAO Lei, *et al.* Study on Intelligent Parameter Identification of SVG Model Considering Stochastic Characteristics of Wind Farm[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(24): 7950-7958, 8232 (in Chinese).(in Chinese).
- [11] 杨蕾,廖佳思,郭成,等.基于限功率运行的 DFIG 与 SVG 协调电压控制策略[J].电力建设,2020,41(10):125-132.
YANG Lei, MIU Jiasi, GUO Cheng, *et al.* Coordinated voltage control strategy of DFIG and SVG based on power limiting operation[J]. Electric Power Construction, 2020, 41(10): 125-132 (in Chinese).(in Chinese).
- [12] 邹赞,王维庆,王海云.基于 SVG 的双馈风电场电压稳定控制策略研究[J].电机与控制应用,2018,45(7):116-121.
ZOU Yun, WANG Weiqing, WANG Haiyun. Study on voltage stability control strategy of doubly fed wind farm based on SVG[J]. Electric Machines & Control Application, 2018, 45(7): 116-121 (in Chinese).(in Chinese).
- [13] 向川,畅昶,周鑫,等.大规模新能源并网下 SVG 协同风电场的电压精细化控制策略[J].电力科学与技术学报,2021,36(5):61-71.
XIANG Chuan, CHANG Chang, ZHOU Xin, *et al.* Voltage

- fine control strategy of SVG coordinated wind farm under large-scale new energy grid connection[J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2021, 36(5): 61–71 (in Chinese).(in Chinese).
- [14] YAO J, GUO L, ZHOU T, XU D and LIU R. Capacity configuration and coordinated operation of a hybrid wind farm with FSIG-based and PMSG-based wind farms during grid faults[J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 2017, 32(3): 1188–1199.
- [15] 包广清, 徐欣, 王晓兰, 等. 电动汽车与风电机组协同的微电网调度策略 [J]. *控制工程*, 2016, 23(9): 1387–1393.
BAO Guangqing, XU Xin, WANG Xiaolan, *et al.* Micro-grid dispatching strategy of electric vehicle and wind turbine[J]. *Control Engineering of China*, 2016, 23(9): 1387–1393 (in Chinese).(in Chinese).
- [16] 吴红斌, 何叶, 赵波, 等. 基于改进 K-means 聚类算法的风电场动态等值 [J]. *太阳能学报*, 2018, 39(11): 3232–3238.
HE Hongbin, HE Ye, ZHAO Bo, *et al.* Dynamic equivalence of wind farm based on improved K-means clustering algorithm[J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2018, 39(11): 3232–3238 (in Chinese).(in Chinese).
- [17] 包广清, 洪元鑫, 刘福潮, 等. 基于 VSC-HVDC 的风电场故障穿越控制 [J]. *兰州理工大学学报*, 2014, 40(2): 86–92.
BAO Guangqing, HONG Yuanxin, LIU Fuchao, *et al.* Fault ride-through control of wind farm based on VSC-HVDC[J]. *Journal of Lanzhou University of Technology*, 2014, 40(2): 86–92 (in Chinese).(in Chinese).
- [18] 同向前, 余健明, 苏文成. 供电技术 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2017.

收稿日期: 2022–11–11

作者简介:

夏楠 (1988), 女, 高级工程师, 研究方向为电力系统恢复策略、新能源建模等, E-mail: pattyxianan@126.com;

王艺华 (2000), 男, 硕士研究生, 通信作者, 研究方向为新能源并网变换器控制, E-mail: wangyh_xaut@163.com;

张阳 (1999), 男, 硕士研究生, 研究方向为新能源发电与并网控制, E-mail: 2211920074@stu.xaut.edu.cn;

党超亮 (1988), 男, 博士, 讲师, 研究方向为多电平并网变换器优化设计、特种电源系统及控制、电能质量测控与新能源技术开发设计等, E-mail: dangclkk@163.com;

段建东 (1973), 男, 博士、教授、博士生导师, 研究方向为电力系统分析、继电保护、新能源接入技术等, E-mail: duanjd@xaut.edu.cn;

同向前 (1961), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统无功补偿新技术、电能质量及其测控技术、电力系统的电力电子控制, E-mail: 2535569989@qq.com。