

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.200437

含大规模风电集群电网的在线计算数据生成技术

摆世彬¹, 严明辉^{2,3}, 徐伟^{2,3}, 蒙金有¹, 孙小湘¹, 周海锋^{2,3}

(1. 国网宁夏电力有限公司, 宁夏 银川 750001; 2. 国电南瑞科技股份有限公司, 江苏 南京 211106;
3. 南瑞集团有限公司, 江苏 南京 211106)

摘要: 风电机组大规模接入导致电网的稳定形态更加复杂, 迫切需要通过在线安全分析提高电网的新能源消纳能力和运行效率。针对在线安全分析难以准确模拟风电场动态特性的问题, 提出了一种含大规模风电集群电网的在线计算数据生成技术。首先, 融合状态估计、SCADA 和安控系统等多源实时数据辨识低电压网络的运行状态, 形成包含风电集群的电网运行方式数据。其中, 根据量测数据的时空关联校正模型, 识别和校正未经过状态估计量测中的不良数据。然后, 依次依据风电机组的静态特征信息和运行状态进行分群, 采用基于层次分析的聚类方法确定风电场的动态等值模型。最后, 通过实际电网的算例分析验证了所提出方法的有效性。

关键词: 在线计算; 大规模风电; 多源数据融合; 低压网络状态识别; 风电场在线等值

An online calculation data generation technology for a power grid integrated with a large-scale wind farm

BAI Shibin¹, YAN Minghui^{2,3}, XU Wei^{2,3}, MENG Jinyou¹, SUN Xiaoxiang¹, ZHOU Haifeng^{2,3}

(1. State Grid Ningxia Electric Power Co., Ltd., Yinchuan 750001, China; 2. NARI Technology Co., Ltd., Nanjing 211106, China; 3. NARI Group Co., Ltd., Nanjing 211106, China)

Abstract: The large-scale integration of wind farms leads to more complex stability modes. Online security and stability analysis is necessary to improve the new energy absorption capacity and operational efficiency of a power grid. An online calculation data generation technology is proposed to simulate the dynamic characteristics of wind farm accurately. First, the operating state of the low-voltage network is identified by the fusion of multi-source real-time data from state estimation, SCADA and security and stability control systems to form operating mode data integrated with wind farm clusters. A spatio-temporal correlation measurement correction model is adopted to identify and correct bad measurement data unhandled by state estimation. Secondly, a clustering method based on Analytic Hierarchy Process (AHP) is used to obtain a dynamic equivalent model of wind farm based on static characteristics and the operating state of wind turbines. Finally, the effectiveness of the method has been verified by cases of the actual power grid.

This work is supported by the Key Research and Development Program of the Ningxia Hui Autonomous Region (No. 5229NX18001W).

Key words: online calculation; large-scale wind power; multi-source data fusion; low voltage network status identification; equivalent wind power generators

0 引言

我国风电主要集中在西北、东北、华北地区, 当前已成为“三北”地区第二大电源, 电网安全运行及可再生能源大规模消纳都面临全新挑战^[1-2]。与常规机组不同, 风电等效转动惯量很小, 缺乏相关

频率调节功能, 电压调节能力有限, 频率、电压耐受能力不足, 在系统频率、电压大幅波动情况下容易脱网, 给系统安全稳定运行带来不利影响。针对风电机组大规模接入的实际电网, 利用在线数据分析重要断面的输电能力、校核安控系统当值策略的适应性、评估新能源连锁脱网风险, 可以有效识别电网的薄弱环节, 提高电网的运行效率^[3-5]。受限于风电场自身条件和调度数据网建设, 调度自动化系统只能接入部分风电场的功率和电压, 状态估计范

基金项目: 宁夏回族自治区重点研发计划项目资助 (5229NX18001W)

围难以覆盖包含风电集群的低电压网络, 而是在 330 kV/220 kV 变电站高压侧将对应网络等值为负荷或者发电机^[6]。因此, 在线安全分析计算数据中缺乏详细风电场计算参数, 在设置稳定断面调整方式、预防控制措施空间和安控切机策略时无法考虑风电机组, 这就导致在线分析结论和电网实际情况存在较大差异, 且更难以准确模拟电网侧发生故障时风电机组的动态特性^[7]。

尽管状态估计模型中未包含风电场数据, 随着风机容量的快速增加, 为了实时监视风电场的实际出力, 调控中心接入了风电场的量测信息^[8-9]。送受端电网配置安控集中管理系统可以直接获取安控装置采集风电场内部馈线、低电压网络部分支路的量测信息。但是, 由于缺乏低压网络模型参数, 无法根据上述实测数据生成包含风电场的在线计算数据。另外, 由于量测数据缺少时标, 无法保证风机出力、风电场馈线安控实测有功、风机或风电整场的 SCADA 采集出力三者之间一致性。

为了提高预想故障下在线安全分析的计算效率, 可在不影响风电场对系统动态特性的条件下对风机进行适当的等值处理^[10-12]。文献[13]提出基于低电压穿越期间有功、无功控制特性的风电场等值方法。文献[14]提出四机聚类方法来表示风电场中的所有风电机组。文献[15]考虑两种等效风模型进行风机等值。文献[16]应用戴维南等效电路进行风电场等值。文献[17]在风电场等值时考虑了实际风电场内尾流效应及风机控制方式不同的情况。文献[18]分析了不同工况下风机等效模型的鲁棒性。但是, 上述研究仅适用于特定的运行方式和故障场景, 而在线安全分析需要在仿真计算前根据风电场的运行状态进行等值, 从而保证分析结论的适应性。

针对上述问题, 本文提出了含大规模风电集群的在线安全计算数据生成技术。通过融合状态估计、SCADA 和安控系统等多源实时数据进行低电压网络运行状态的辨识, 形成包含风电集群的电网运行方式数据; 建立量测数据的时空关联校正模型, 实现节点功率注入量测的坏数据识别和校正; 依次依据风电机组的静态特征信息和运行状态进行分群, 采用基于层次分析的聚类方法实现风电场动态模型的在线等值。

1 在线数据生成的总体思路

为了实现含大规模风电集群电网的在线安全分析, 需要在状态估计结果中补充低电压网络的模型及状态, 形成包含详细风电场模型的全网运行数据。因此, 对于有量测的设备可以直接确定其运行状态,

对于无量测的设备依据典型方式确定其运行状态。如果低电压网络的总有功与状态估计结果中等值设备的有功存在差异, 还需要调整无量测设备的有功。在识别低电压网络状态的基础上, 将低电压网络与状态估计结果中的主网架进行拼接(如图 1 所示, 实线为状态估计建模部分, 虚线为低电压网络拼接部分), 从而形成全网潮流数据。

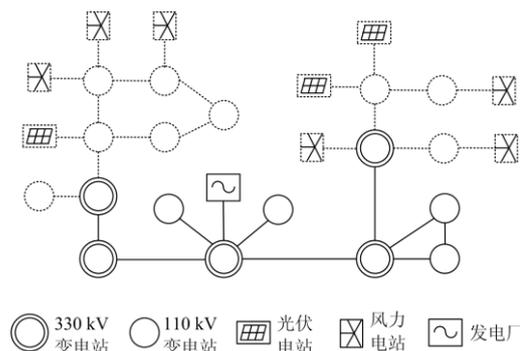


图 1 电网结构示意图

Fig. 1 Diagram of grid structure

风电机组的动态模型包括机组模型、电压穿越保护模型、桨距角控制、有功控制和无功控制等部分。由于限幅环节的影响, 风电机组处于不同运行点时的低压穿越特性、有功和无功动态响应差异较大, 若采用单机倍乘法将所有风机等值为出力相同的多台机组, 与实际状态会存在较大误差。由于风速存在较大不确定性, 难以离线确定风电场在线等值群数和等值机台数。因此, 需要根据风电场内部各风机的出力情况进行在线等值, 确定与当前方式匹配的风电场动态模型。另外, 根据策略模型和电网运行状态可以在线识别安控系统的当值策略。其中, 风电场一般按馈线进行切除操作, 这就需要在动态等值过程中建立等值风机和馈线的映射关系。

含大规模风电集群的在线数据生成的总体流程包括以下步骤:

- 1) 依据典型方式建立状态估计未建模的低电压网络模型, 包括拓扑关系和支路参数;
- 2) 融合典型方式出力、SCADA 量测、安控量测和状态估计等值量测识别低电压网络的状态;
- 3) 将状态结果中的等值设备替换为对应的低电压网络, 进行全网潮流计算, 形成包括风电场的运行数据;
- 4) 根据馈线有功或者整场出力对风机出力进行调整, 考虑安控策略和风机的响应特性采用聚类算法确定分群策略;
- 5) 按保守性原则确定各群的机组台数, 形成在线安全分析的动态模型;

6) 根据故障形态确定预想故障下安控系统需要控制的风电机组和控制量, 通过机电暂态仿真确定风电机组的涉网保护动作情况。

2 低电压网络状态识别

可用于低电压网络状态识别的数据包括状态估计结果中等值设备的潮流、安控系统监测设备的潮流、SCADA 采集风电场的潮流。由于不满足可观测性的要求, 无法通过状态估计来直接获取各风电场的潮流及支路的拓扑状态。对于无量测的风电场和支路, 只能根据典型方式确定其出力和拓扑状态。

未经过状态估计的量测数据可能存在误差或者坏数据, 需要根据各类量测的合理分布范围及不同来源的量测数据进行校验。

2.1 状态识别的基本原则

为了保证拼接低电压网络后全网潮流的收敛性, 按以下原则进行状态识别^[19]。

1) SCADA 采用全数据及变化数据相结合的传输模式, 即正常上送变化数据, 主站定周期召唤全网数据; 安控采集数据采用主站定周期(远小于 SCADA) 召唤的传输模式, 而安控系统一般通过配置多套装置来保证可靠性。因此, 安控采集数据的刷新速度和可靠性要高于 SCADA 采集数据, 应根据安控采集数据对 SCADA 采集数据进行校正。

2) 为了识别量测数据的坏数据, 根据设备有功、无功和母线电压的可行域, 分别对安控采集数据、SCADA 采集数据进行错误检查并剔除错误数据; 利用不同测点量测数据之间的时空关联关系, 识别和修正可疑数据。其中, 在时间维度上, 采用时间序列法获取量测的预测值, 并对当前时刻量测进行校对和修正; 在空间维度上, 根据支路参数和两端的量测进行数据校正。

3) 为避免出现遥信量和遥测量存在矛盾的情况, 根据遥测量可信度大于遥信量的原则, 分别以安控采集数据、SCADA 采集数据中的遥测量为准来检查并修正安控采集数据、SCADA 采集数据中的开关、刀闸遥信量。

4) 为了保证低电压网络拼接前后拼接点的电压偏差和不平衡功率满足要求, 需要按状态估计结果中等值设备的状态确定低电压网络的整体功率水平。其中, 量测数据通过经过检查和修正的设备不参与潮流调整。规定低电压网络向主网送电为正方向, 当功率偏差为正时, 按降发电出力、增负荷有功的次序进行调整; 当功率偏差为负时, 按降负荷有功、增发电出力的次序进行调整。若功率分摊之后仍存在不平衡功率, 将不平衡功率作为等值设备

接入状态估计拼接点。

2.2 量测数据的时空关联校正

2.2.1 量测数据时间维度修正

由于 SCADA 数据不带时标, 且调度主站服务器已同步对时, 考虑到量测数据在采集、传输等过程的时延, 可在调度主站接收到量测数据时间考虑时延补偿, 得到 SCADA 量测数据时间。根据 2.1 节所述原则, 完成安控采集数据和 SCADA 数据的整合, 得到一段时间内固定时间间隔的量测数据时间序列。利用自回归移动平均模型(ARMA), 可分析处理一段时间内量测数据的变化趋势, 拟合得到当前时刻量测数据的预测值, 修正量测数据实测值, 从而实现量测数据时间维度修正^[20]。

1) ARMA 模型。当前时刻量测值 y_t 可由有限个加权的过去时刻量测值线性组合及干扰量 ε_t 来表示, 移动平均模型由随机干扰项的当期和滞后项的加权之和确定。一个 p 阶的 AR 模型和 q 阶的 MA 模型可分别表示为式(1)和式(2)。

$$y_t = \varphi_0 + \varphi_1 y_{t-1} + \varphi_2 y_{t-2} + \cdots + \varphi_p y_{t-p} + \varepsilon_t \quad (1)$$

$$y_t = c_0 + \varepsilon_t - \theta_1 \varepsilon_{t-1} - \theta_2 \varepsilon_{t-2} - \cdots - \theta_q \varepsilon_{t-q} \quad (2)$$

将 AR 和 MA 模型结合起来构成可以用来描述平稳随机过程的自回归移动平均模型 ARMA, (p, q) 阶的 ARMA 模型的数学表达式为

$$y_t = \varphi_0 + \varphi_1 y_{t-1} + \varphi_2 y_{t-2} + \cdots + \varphi_p y_{t-p} + \varepsilon_t - \theta_1 \varepsilon_{t-1} - \theta_2 \varepsilon_{t-2} - \cdots - \theta_q \varepsilon_{t-q} \quad (3)$$

式中, ε_t 为白噪声, 且和 y_{t-k} ($k = 1, 2, \dots, p$) 独立, 当特征方程 $1 - \varphi_1 x - \varphi_2 x^2 - \cdots - \varphi_p x^p = 0$ 所有根的模都在单位圆外时满足模型的弱平稳条件。

2) 量测数据修正。对于量测量 y , 若该量测量 y 有相应的 ARMA 模型预测数据 y_1 与实测数据 y_2 , 则采用式(4)计算该量测量 y 。

$$y = \lambda y_1 + (1 - \lambda) y_2 \quad (4)$$

式中, λ 为加权系数, 根据实际工程确定。

若节点或支路量测已根据时间维度修正, 则认为该节点或支路量测数据可信度高于未修测量数据。

2.2.2 量测数据空间维度修正

由于全网量测数据更新周期不一致, 且低电压网络的实测数据未覆盖所有节点或支路设备, 这就造成部分设备量测缺失, 或者部分节点或支路量测可信度低于相邻节点或支路。利用时间维度已修正的量测数据和支路模型参数, 利用节点与支路量测量约束关系, 可实现空间维度不同节点或支路的量测数据修正。

图2是典型的 π 型线路模型图, 假设末端电压 \dot{U}_2 及功率 $\tilde{S}_2(P_2 + jQ_2)$ 已知, 则首端功率 \tilde{S}_1 为

$$\tilde{S}_1 = \tilde{S}_2 + \Delta\tilde{S}_k + \Delta\tilde{S}_{y_2} + \Delta\tilde{S}_z + \Delta\tilde{S}_{y_1} \quad (5)$$

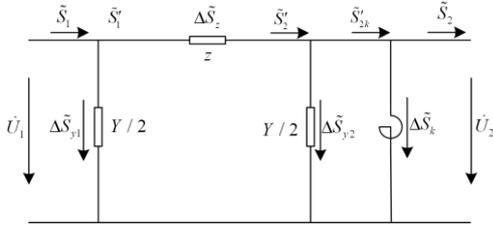


图2 线路的等值电路

Fig. 2 Equivalent circuit of AC line

其中末端导纳支路的功率 $\Delta\tilde{S}_{y_2}$ 为

$$\Delta\tilde{S}_{y_2} = \left(\frac{Y}{2}U_2\right)^*U_2 = \frac{1}{2}(G - jB)U_2^2 = \Delta P_{y_2} - j\Delta Q_{y_2} \quad (6)$$

阻抗末端功率 \tilde{S}'_2 为

$$\tilde{S}'_2 = \dot{S}_2 + \Delta\tilde{S}_{y_2} + \Delta\tilde{S}_k = P'_2 + jQ'_2 \quad (7)$$

阻抗支路损耗功率 $\Delta\tilde{S}_z$ 为

$$\Delta\tilde{S}_z = \left(\frac{S'_2}{U_2}\right)^2 Z = \frac{P_2'^2 + Q_2'^2}{U_2^2} R + j \frac{P_2'^2 + Q_2'^2}{U_2^2} X = \Delta P_z + j\Delta Q_z \quad (8)$$

首端导纳支路的功率 $\Delta\tilde{S}_{y_1}$ 为

$$\Delta\tilde{S}_{y_1} = \left(\frac{Y}{2}U_1\right)^*U_1 = \frac{1}{2}GU_1^2 - \frac{1}{2}jBU_1^2 = \Delta P_{y_1} - j\Delta Q_{y_1} \quad (9)$$

另外, 首端电压 \dot{U}_1 为

$$\dot{U}_1 = U_2 + \frac{P'_2 - jQ'_2}{U_2}(R + jX) \quad (10)$$

若线路末端厂站所在节点注入功率已经校核, 首先根据基尔霍夫定律及设备有功、无功和母线电压的可行域, 识别和修正可疑数据, 根据式(5)一式(10)得出线路首端有功、无功和电压, 然后根据式(4)修正线路首端量测。再根据修正后首端量测, 得到线路末端量测, 根据式(4)完成线路末端量测修正。变压器绕组、串补等其他支路可同样采用本方法进行量测校正。

3 风电场动态模型在线等值

在线安全分析需要准确模拟预想故障下风电场的动态响应, 特别是严重故障下的风机脱网情况及其对暂态过程中电压、频率的影响^[10,21-23]。大规模风电基地的装机可能达到上千台, 在线安全分析并不关心风电场内部各台风机的响应情况, 可以对风

电场内的风机进行适当的等值处理, 在基本保证风电场对系统动态特性影响不变的条件下提高在线安全分析的计算效率。

在线安全分析的预想故障集包括不同类型的交流系统故障和直流系统故障, 受气象环境影响风电机组的运行状态在短时间内也会有较大的变化。根据指定故障场景下风电场的动态响应特性进行风电场等值, 得到的等值模型难以覆盖所有故障场景。因此, 与离线研究不同, 风电场在线等值的难点是要在仿真计算前根据风电机组的类型、拓扑连接、保护定值等静态特性, 以及风速、桨距角和控制模式等动态特性确定等值模型。

3.1 风电场动态特性及影响因素分析

对于实际风电场而言, 同时投产的风机基本上采用完全相同的风电机组。风机的生产厂家会提供风机动态模型中详细的实测参数。针对特定故障场景计算等值风机参数的方法不仅计算量大, 也难以满足多故障场景下准确性的要求。因此, 本文采用输出倍法来表征等值风机, 在线应用时根据实测风机的出力、风速和桨距角数据确定动态模型中等值风机的台数和风速。商业化的机电暂态仿真软件提供了详细的风机动态模型, 其中, 风机控制系统和电气控制系统的响应与风电机组的运行状态密切相关。

对于采用变桨距的变速风机来说, 风机的控制目标就是尽可能地从可利用风能中获得更多的功率且不超过设备的额定值。当风速高于额定风速时, 调节叶片桨距角控制机械功率为额定值, 风速低于额定值时, 桨距角设定在最小值以获取最大的功率。图3给出了交流系统故障时不同风速下风机的有功响应情况。因此, 桨距角控制对动态仿真的结果影响较大, 需要根据桨距角动作情况进行分群。

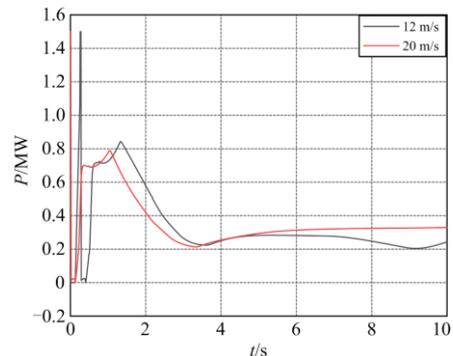


图3 不同风速风机有功响应曲线

Fig. 3 Wind power active power response curves under different speed

电气控制部分包括电气控制模型和变频器模型,其中,电气控制模型包括有功功率控制、无功功率控制和电压穿越控制策略等部分,暂态过程中各控制环节的控制策略如下。

1) 有功功率控制根据风轮机模型输出的功率指令和机端电压计算有功电流控制指令,该指令受换流器短时有功电流输出能力的限制。

2) 无功功率控制根据待控制节点电压与参考电压的差值、机组无功功率和机端电压计算励磁电压控制指令,该指令受机组无功出力范围和励磁电流范围的限制。

3) 电压穿越控制根据电压状态切换控制策略,进行电压穿越状态下的有功、无功控制。其中,有功控制包括根据初始功率计算电流、指定电流、指定功率等方式;无功控制包括基于电压控制、指定无功、指定电流等方式;限幅环节包括有功出力范围和无功出力范围限制。

由此可见,根据风电机组的有功出力和机端电压对各控制环节的状态变量初始化,有功和无功响应情况还与故障过程中风电场近区的电压跌落程度相关。由于限幅环节的存在,不同出力水平风机的有功、无功响应存在较大差异,如图4所示。因此,对于未达到额定出力的机组,需要根据风机出力水平进行分群。

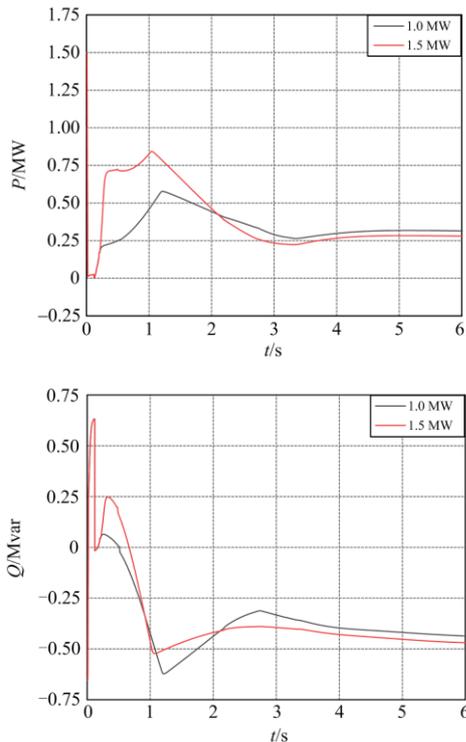


图4 不同出力水平风机响应曲线

Fig. 4 Wind power response curves under different active power

3.2 基于层次分析的风机聚类方法

为了满足在线安全分析对风电场动态特性模型的需要,本文按所属馈线、风机类型、额定容量、保护定值、有功出力和桨距角的次序进行层次分析,对风机进行分组。其中,有功出力按是否到达额定出力进行分组,桨距角按是否动作进行分组。同一分组内的风机属于同一馈线、风机类型相同、额定容量相同、有功均小于(或达到)额定出力、桨距角均(或均未)动作。

对于有功均小于额定出力的分组,根据出力分布情况和设定的分类阈值确定最佳的风机群数,具体步骤如下:

1) 将每个风机按出力水平单独成为一类,计算各个类之间的距离,将各类间距离的最小值作为当前的合并距离;

2) 将各类间距离最小的2个类合并为一个新类,并重新计算各个类之间的距离(类间距离采用2个类中所包含风机相互之间距离的最大者);

3) 当前后两次合并对应的合并距离变化量小于指定阈值时,得到最优分群数。

对于有功达到额定出力的分组根据桨距角分布情况采用类似的方法确定最佳风机群数。

3.3 等值机参数聚合方法

将各群包含风机的台数 m 作为等值模型中的风机台数,将各风机平均风速作为等值模型中的风数。变压器等值参数可根据式(11)得到,干线式和放射式集电线路等值阻抗可分别根据式(12)和式(13)得到。

$$\begin{cases} S_{T_eq} = mS_T \\ x_{T_eq} = \frac{x_T}{m} \end{cases} \quad (11)$$

$$Z_{eq} = \sum_{i=1}^m \left(\sum_{k=1}^i \left(Z_k \sum_{j=k}^n P_j \right) P_i \right) / \left(\sum_{i=1}^m P_i \right)^2 \quad (12)$$

$$Z_{eq} = \sum_{i=1}^m Z_i P_i^2 / \left(\sum_{i=1}^m P_i \right)^2 \quad (13)$$

式中: S_T 和 x_T 分别为变压器容量和电抗; Z_k 为第 k 条电缆的阻抗; P_i 为第 i 台风电机组的输出功率; n 表示干线式连接的机组数。

4 算例分析

本文所提技术在西北、宁夏和甘肃等省级及以上电网已得到实际应用。2018年,西北电网风电装机容量为48914.28 MW,风电装机占比19.39%,风电最大电力占当天负荷的比例达到33.07%。应用本文所述技术,可在生成在线计算数据时提供精细

化风电场模型数据, 提高仿真分析精度。

4.1 含低压网络模型的全网数据生成

目前, 调控中心可通过风电场实时监控系、风电场有功预测系统及 SCADA 系统实现风电场状态监视。而状态估计中, 通常在 220 kV 或 330 kV 等值为负荷。以玉门站为例, 在 330 kV 母线处将两台主变等值为负荷建模, 如图 5 所示, 某方式下低压网络往主网送电 290.76 MW。

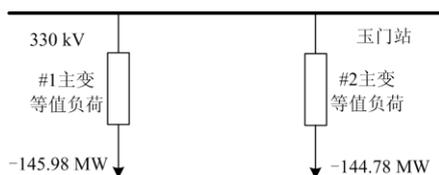


图 5 状态估计模型

Fig. 5 State estimation model

拼接后网络如图 6 所示, 风电场及汇集站的完整结构已建立。状态估计主网基础上拼接低压网络前后网络规模对比如表 1 所示。

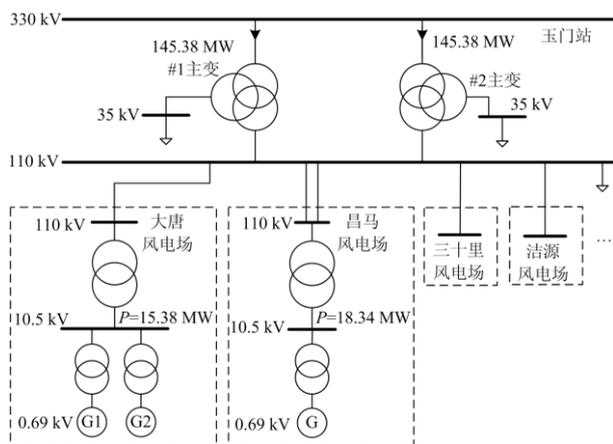


图 6 拼接后网络拓扑

Fig. 6 Network topology after splicing

表 1 电网规模比较

Table 1 Comparison of grid scale

数据类型	计算节点数	线路数	绕组数
状态估计	1 533	1 532	742
拼接后	4 372	2 839	2 764

4.2 风电机组在线等值

图 6 网络中, 各风机的模型为多个相同状态单机模型的聚合。实际风电场中有多条馈线, 每条馈线有多台风机。图 7 是昌马风电场某条馈线风机拓扑图。

风机 A1-01—风机 A1-07 停运, 其他投运风机实测状态如表 2 所示, 各台变压器参数(有名值)为

$$R = 0.22 \Omega, \quad X = 4.55 \Omega.$$

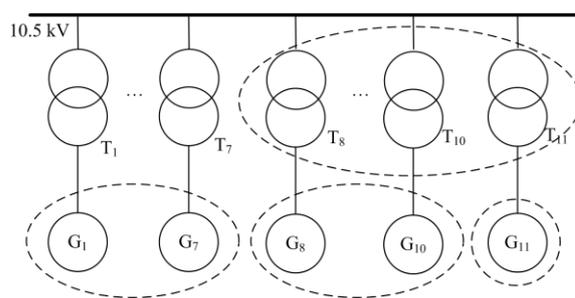


图 7 昌马风电场机组分群分组

Fig. 7 Wind power generator grouping in Changma wind farm

表 2 风机实测量

Table 2 Measurement of wind power generator

名称	有功	风速	桨距角
风机 A1-08	0.156	6.48	2.8
风机 A1-09	0.154	6.75	2.4
风机 A1-10	0.134	6.23	2.8
风机 A1-11	1.438	2.31	3.6

根据风机状态, 图 7 风机可分为 3 群, 虚线圆圈内机组为同一群。等值后拓扑图如图 8 所示, 各等值机功率如表 3 所示, 等值变压器参数(有名值)为 $R = 0.055 \Omega, X = 1.14 \Omega$ 。

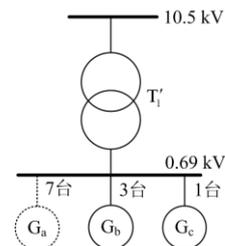


图 8 等值后拓扑

Fig. 8 Equivalent topological diagram

表 3 等值机信息

Table 3 Information of equivalent generator

等值机编号	有功	对应机组
a	0	1~7
b	0.444	8~10
c	1.438	11

4.3 仿真计算

基于西北电网进行分析。当祁韶直流双极闭锁后, 基于以下两种算例模型, 监视桥湾站 330 kV 母线电压和频率响应情况。

算例 1 不计及风电场模型, 在高压侧母线将风电场等值。

算例 2 计及风电场模型, 根据本文所述方法将大规模风电场在线等值。

仿真结果见图 9、图 10。对于图 9, 算例 2 由于风机网侧具有定无功控制特性, 直流闭锁后暂态过电压比无风机模型时小, 且故障后母线电压更加平缓。对于图 10, 算例 2 风机转子侧的定有功控制特性, 使得故障后母线暂态最大频率比无风机模型时低; 故障后母线电压平缓, 进而导致风电场有功变化平缓, 因此故障后母线频率恢复也平缓。仿真对比结果表明, 在线考虑大规模风电场等值后的模型更能准确反映实际电网运行状态。

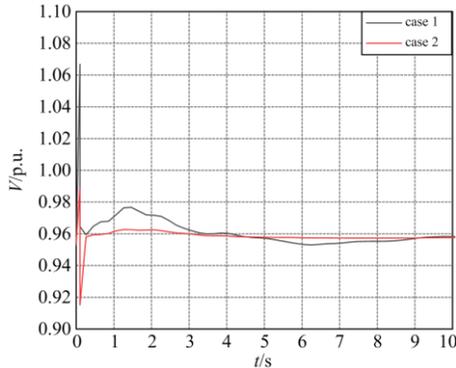


图 9 故障后母线电压曲线
Fig. 9 Bus voltage curve after the fault

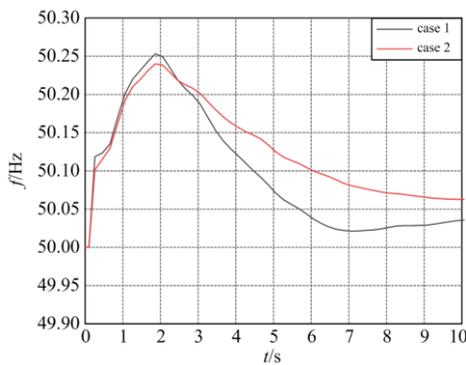


图 10 故障后母线频率曲线
Fig. 10 Bus frequency curve after the fault

5 结语

本文提出一种含大规模风电集群的在线安全计算数据生成技术。通过融合状态估计、SCADA 和安控系统等多源实时数据进行低电压网络运行状态的辨识, 形成包含风电集群的电网运行方式数据。建立量测数据的时空关联校正模型, 基于历史量测数据和支路参数, 实现节点注入量测可疑数据识别和校正。通过风电场等值, 建立了满足在线安全分析需求的数据。实际电网运行结果验证了该方法的

正确性和可行性。

参考文献

[1] ATHARI M H, WANG Z. Impacts of wind power uncertainty on grid vulnerability to cascading overload failures[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2018, 9(1): 128-137.

[2] 孙玉娇, 吴俊玲, 王雅婷, 等. 新能源接入对西北—新疆联网通道输电能力及系统安全稳定性影响分析[J]. 电力建设, 2016, 37(6): 17-23.
SUN Yujiao, WU Junling, WANG Yating, et al. Influence analysis of renewable power resources' integration on transmission capability of northwest to Xinjiang power corridor and system's security and stability[J]. Electric Power Construction, 2016, 37(6): 17-23.

[3] 薛禹胜, 雷兴, 薛峰, 等. 关于风电不确定性对电力系统影响的评述[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(29): 5029-5040.
XUE Yusheng, LEI Xing, XUE Feng, et al. A review on impacts of wind power uncertainties on power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29): 5029-5040.

[4] CHIANG H D, TONG J Z, TADA Y. On-line transient stability screening of 14000-bus models using TEPCO-BCU evaluation and methods[C] // 2010 IEEE PES General Meeting, 2010, Minneapolis, USA: 1-8.

[5] 孙树明, 谢昶, 吕颖, 等. 电力系统在线安全稳定分析应用模式[J]. 电网技术, 2015, 39(10): 2875-2881.
SUN Shuming, XIE Chang, LÜ Ying, et al. Power system online security and stability analysis application modes[J]. Power System Technology, 2015, 39(10): 2875-2881.

[6] 丁平, 徐友平, 汪剑波, 等. 大电网在线动态安全评估系统电网模型特性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(19): 132-139.
DING Ping, XU Youping, WANG Jianbo, et al. Study of the characteristics of grid model for online dynamic security assessment system in bulk power systems[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(19): 132-139.

[7] 方俊杰. 模型不确定性对自适应闭环紧急控制设计影响的探讨[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(16): 49-53.
FANG Yongjie. Discussion on influence of model uncertainties on closed-loop adaptive stability control design[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(16): 49-53.

[8] 林俐, 朱晨宸, 郑太一, 等. 风电集群有功功率控制及其策略[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(14): 9-16.
LIN Li, ZHU Chenchen, ZHENG Taiyi, et al. Active power control of wind farm cluster and its strategy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(14): 9-16.

- [9] 薛峰, 常康, 汪宁渤. 大规模间歇式能源发电并网集群协调控制框架[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(22): 45-53.
XUE Feng, CHANG Kang, WANG Ningbo. Coordinated control frame of large-scale intermittent power plant cluster[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(22): 45-53.
- [10] 周红婷, 谢欢, 吴涛, 等. 张北高电压脱网事故中风电场动态行为分析与仿真[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(2): 54-60.
ZHOU Hongting, XIE Huan, WU Tao, et al. Analysis and simulation of wind farm dynamic behavior in high-voltage trip-off accident of Zhangbei[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(2): 54-60.
- [11] MOHDZIN A A B, MAHMOUD P H A, KHAIRUDDIN A B, et al. An overview on doubly fed induction generators controls and contributions to wind based electricity generation[J]. Renewable Sustainable Energy Reviews, 2013, 27: 692-708.
- [12] MAHELA O P, SHAIK A G. Comprehensive overview of grid interfaced wind energy generation systems[J]. Renewable Sustainable Energy Reviews, 2016, 57: 260-281.
- [13] 侯俊贤, 陶向宇, 张静, 等. 基于低电压穿越控制策略的风电场等值方法[J]. 电网技术, 2015, 39(5): 1281-1286.
HOU Junxian, TAO Xiangyu, ZHANG Jing, et al. A low-voltage ride-through control strategy based equivalence method for wind farms[J]. Power System Technology, 2015, 39(5): 1281-1286.
- [14] LI Weixing, CHAO Pupu, LIANG Xiaodong, et al. A practical equivalent method for DFIG wind farms[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2018, 9(2): 610-620.
- [15] FERNÁNDEZ L M, GARCÍA C A, SAENZ J R, et al. Equivalent models of wind farms by using aggregated wind turbines and equivalent winds[J]. Energy Conversion and Management, 2009, 50: 691-704.
- [16] 周海强, 张明山, 薛禹胜, 等. 基于戴维南电路的双馈风电场动态等值方法[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(23): 42-47, 53.
ZHOU Haiqiang, ZHANG Mingshan, XUE Yusheng, et al. A dynamic equivalent method for doubly-fed induction generator wind farm based on the Thevenin equivalent circuit[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(23): 42-47, 53.
- [17] 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.
- [18] ZHOU Yuhao, ZHAO Long, LEE W. Robustness analysis of dynamic equivalent model of DFIG wind farm for stability study[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2018, 54(6): 5682-5690.
- [19] 卢建刚, 温柏坚, 姜彩玉, 等. 基于“多源数据”处理的EMS实时数据优选技术及其实现[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(23): 73-75.
LU Jiangang, WEN Bojian, JIANG Caiyu, et al. Research of multi-source data and its quality control in energy management system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(23): 73-75.
- [20] BILLINTON R, CHEN H, GHAJAR R. Time-series models for reliability evaluation of power systems including wind energy[J]. Microelectronics Reliability, 1996, 36(9): 1253-1261.
- [21] 李振兴, 王振宇, 翁汉俐, 等. 兼顾源网安全的大规模电力外送基地多机失步保护动作策略[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(18): 68-75.
LI Zhenxing, WANG Zhenyu, WENG Hanli, et al. Multi-generator out-of-step protection strategy for large-scale power transmission base[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(18): 68-75.
- [22] MENSOU S, ESSADKI A, NASSER T, et al. A direct power control of a DFIG based-WECS during symmetrical voltage dips[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2020, 5(1): 36-47. DOI: 10.1186/s41601-019-0148-y.
- [23] 古庭赞, 杨骐嘉, 林呈辉, 等. 基于单机等值与选择模态分析的风电场等值建模方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(1): 102-111.
GU Tingyun, YANG Qijia, LIN Chenghui, et al. A wind farm equivalent modeling method based on single-machine equivalent modeling and selection modal analysis[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(1): 102-111.

收稿日期: 2020-04-22; 修回日期: 2020-06-24

作者简介:

摆世彬(1984—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统稳定性分析; E-mail: dawn_chorus@163.com

严明辉(1987—), 男, 通信作者, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统稳定与控制; E-mail: yanminghui@sgepri.sgcc.com.cn

徐伟(1982—), 男, 博士, 研究员级高级工程师, 主要研究方向为电力系统稳定分析与控制。E-mail: xu-wei@sgepri.sgcc.com.cn

(编辑 许威)