

引用格式:张迪,刘明洋,陈骏鹏,等.高渗透率分布式光伏并网下宽频振荡分析方法[J].电力科学与技术学报,2026,41(1):163-173.

Citation:ZHANG Di, LIU Mingyang, CHEN Junpeng, et al. Wide-band oscillation analysis method for grid-connected distributed photovoltaics with high penetration rate[J]. Journal of Electric Power Science and Technology,2026,41(1):163-173.

高渗透率分布式光伏并网下宽频振荡分析方法

张迪¹,刘明洋¹,陈骏鹏^{2,3},高泽¹,王骅¹,谭昊宇^{2,3},苗世洪^{2,3}

(1.国网河南省电力公司电力科学研究院,河南 郑州 450052;2.强电磁技术全国重点实验室(华中科技大学),湖北 武汉 430074;
3.华中科技大学电气与电子工程学院,湖北 武汉 430074)

摘要:随着配电网分布式光伏渗透率的不断攀升,以并网逆变器为代表的电力电子设备对电网的影响日益增强,电网宽频振荡风险加剧。而现有研究中少有提出满足含高渗透率分布式光伏并网安全运行条件的宽频振荡稳定判据,以致无法对其采取有效的抑制措施。鉴于此,提出一种基于等值模型的高渗透率分布式光伏并网下宽频振荡的分析方法。首先,研究了分布式光伏集群划分和聚合建模方法,建立了配电网等值模型;其次,基于等值模型开展宽频振荡分析,提出了高渗透率分布式光伏并网下宽频振荡的分析方法;再次,通过扫频法获取等值模型的阻抗特性,并进行宽频振荡分析;最后,基于 Simulink 搭建 IEEE 33 详细模型和等值模型,在实际 110 kV 区域配电网等值模型中进行仿真,通过对比不同模型的阻抗特性仿真结果,验证了所提宽频振荡分析方法的有效性。

关键词:分布式光伏;宽频振荡;等值模型;阻抗特性;扫频法

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2026.01.016 中图分类号:TM615 文章编号:1673-9140(2026)01-0163-11

Wide-band oscillation analysis method for grid-connected distributed photovoltaics with high penetration rate

ZHANG Di¹, LIU Mingyang¹, CHEN Junpeng^{2,3}, GAO Ze¹,
WANG Hua¹, TAN Haoyu^{2,3}, MIAO Shihong^{2,3}

(1.Electric Power Research Institute, State Grid Henan Electric Power Company, Zhengzhou 450052, China; 2.State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 3.School of Electrical and Electronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: With the continuous increase in the penetration rate of distributed photovoltaics (PV) in the distribution network, the impact of power electronic equipment represented by grid-connected inverters on the power grid is increasing, and the risk of wide-band oscillation in the power grid is intensifying. However, few existing studies have proposed wide-band oscillation stability criteria to meet the safe operation of grid-connected distributed PV with a high penetration rate, so that effective suppression measures cannot be taken. In view of this, an analysis method for wide-band oscillation under grid-connected distributed PV with a high penetration rate based on the equivalent model is proposed. Firstly, the distributed PV cluster division and aggregation modeling methods are studied, and the equivalent model of the distribution network is established. Secondly, the wide-band oscillation analysis is carried out based on the equivalent model, and the analysis method of wide-band oscillation under the grid-connected distributed PV with high penetration rate is proposed. Then, the impedance characteristics of the equivalent model are obtained by the frequency sweep method, and the wide-band oscillation analysis is carried out. Finally, the IEEE 33 detailed model and equivalent model are built based on Simulink, and the simulation research is carried out in the equivalent model of the actual 110 kV

收稿日期:2024-11-05;修回日期:2025-02-27

基金项目:国网河南省电力公司科技项目(521702240019)

通信作者:苗世洪(1963—),男,博士,教授,主要从事电力系统保护、控制及计算,储能系统及应用,配电网及微电网新技术等研究;E-mail:shmiao@hust.edu.cn

regional distribution network; the effectiveness of the wide-band oscillation analysis method proposed in this paper is verified by comparing the simulation results of the impedance characteristics of different models.

Key words: distributed photovoltaics; wide-band oscillation; equivalent model; impedance characteristic; frequency sweep method

当前,为实现绿色可持续发展,以大规模开发利用新能源为主要特征的电力系统正处在清洁转型和自我革新的新阶段,分布式光伏发电已成为中国新能源发展的一种重要形式^[1-3]。而电源、网络和负荷之间的相互作用^[4-7],可能导致新型电力系统有在几赫兹到数千赫兹频率范围内发生失稳性宽频振荡的风险,且配电网宽频振荡问题通常会对设备安全、用电质量和电网稳定产生影响^[8-10]。因此,提出适用于高渗透率分布式光伏配电网的宽频振荡分析方法,对于构建安全充裕的新型电力系统具有重要意义^[11-13]。

宽频振荡是指在新型电力系统中的电力电子设备之间及其与电网之间相互作用所引起的电气量随时间作周期性波动,且振荡频率在较宽范围内变化的动态过程^[14]。国家电网有限公司发布的《电力系统宽频测量装置技术规范》考虑行业内已对低频振荡和次/超同步振荡有相对清晰的了解,将较高频段的振荡单独列出,明确了100~2 500 Hz为宽频振荡^[15]。

目前,已有不少学者开展了针对新能源并网宽频振荡问题的研究。文献[16]采用复向量阻抗来研究大规模集中式风电场并网出现的振荡问题;文献[17]运用状态空间矩阵和根轨迹分析法研究集中式光伏并网时控制器参数对系统振荡模态的影响。然而,配电网分布式光伏与集中式光伏存在较大差异,集中式新能源场站内的机组间依托线路连接,不同机组之间的电气距离较小,与场站并网点之间的电气距离也相近,耦合机理相对简单。分布式新能源位于供电台区内,通常与用户负荷交错分布,电源、负荷以及配电网与上级电网的公共连接点(point of common coupling, PCC)三者之间通过配电网网架连接,配电网拓扑结构复杂,使得源、网、荷之间的交互作用错综复杂。现有研究大多针对集中式新能源场站并网进行分析,少有研究考虑高渗透率分布式新能源并入配网后,配网与主网之间的宽频振荡风险。

为了有效判断系统是否稳定,学者们提出了诸多研究宽频振荡的方法,在解析计算法方面已有大量研究成果。文献[18]基于频域 dq 阻抗模型,研究

了三相逆变并网系统的宽频谐振问题;文献[19]基于带有分布式电源的配电网,建立了具有有源滤波器(active power filter, APF)功能的逆变器小信号模型。以上文献所提出的解析算法可以获得振荡特性与影响因素之间的数学关系,有助于对振荡的内在机理有更好的认识,适用于简单系统的分析计算。但复杂电力系统具有强非线性,且现有相关研究都建立在新能源机组控制策略和外部条件已知的基础上,在实际配电网中,由于厂家不会给出新能源机组控制策略以及控制参数,无法建立对应的阻抗模型,使得解析法难以分析出振荡的动态行为。

除上述解析计算方法外,目前常用的分析方法还有数值仿真法。国内外学者针对光伏集群采用了各种新型的数值仿真方法,提出了各种精确的动态建模框架,用于分析电网动态响应^[20-23]。以上文献所提方法虽然可以通过仿真实验直观地反映系统在特定参数下的整体动态过程,但是无法获取参数对系统振荡影响的内在机理。为了解决该问题,可以采用频率扫描法,该方法基于数值仿真,具有操作简单和物理意义明确等优点,在工程上得到了广泛应用。现有文献大多仅将频率扫描法用于解析模型的验证,少有采用该方法拟合出未知模型的阻抗特性,忽略了其不依赖于机组控制参数的特点。文献[24]利用频率扫描法探究了双馈风力发电并网系统的高频谐振特性,但是其详细模型扫描耗时较长,且建模相对困难。针对上述缺点,文献[25]对集中式光伏电站单机等值模型进行了频率扫描,在此基础上开展了高频谐波谐振研究,提高了分析速度。但此文献只研究了集中式光伏电站,且采用的是相对粗糙的单机等值方法,这种等值建模方法会忽略不同型号光伏发电机组动态特性的差异,同时其还需考量分布式光伏的适用性,尤其是使用频率扫描法分析精细等值模型宽频振荡的有效性还有待进一步研究。

鉴于此,本文在宽频振荡可接受性的实用判据基础上,提出了一种基于等值模型的宽频振荡分析方法。首先,结合行业标准提出了高渗透率分布式光伏配电网的等值建模方法;其次,基于等值模型

开展宽频振荡研究,提出了高渗透率分布式光伏配电网的宽频振荡分析方法;再次,通过扫频法构建等值模型的系统奈奎斯特图和阻抗特性伯德图进行宽频振荡分析;最后,基于 Simulink 搭建 IEEE 33 详细模型和等值模型,通过对比不同模型的阻抗特性仿真结果,验证本文所提宽频振荡分析方法的有效性,并在实际 110 kV 区域配电网等值模型中进行了研究。

1 高渗透率分布式光伏配电网等值建模

分析系统是否会发生宽频振荡,需要获得其阻抗特性。虽然扫频法相较于解析法更容易获得复杂未知电力系统的阻抗特性,但是针对详细模型进行扫频相当耗时,因此对其进行简化可以在一定程度上提高模型的仿真速度^[25]。现有研究大多用一个等效的光伏发电单元取代所有的分布式光伏,由于一个配电台区实际上具有多种分布式光伏,逆变器模型或参数存在差异,这种建模方法会忽略发电机组动态特性的差异,进而影响等值模型的阻抗特性。

本文结合已有的等值模型研究和相关行业标准,提出了高渗透率分布式光伏配电网等值建模的总体思路:

- 1) 根据合适的指标,将海量分布式光伏划分为若干集群,使得集群内部的分布式光伏特性相似;
- 2) 按照功率一致等条件,将同一集群内部特性相似的多台分布式光伏等值为一台电源,实现分布式光伏数量的削减;
- 3) 构造等值机组与原有配电网之间相互连接的等值网络,将等值机组通过等值网络接入原有配电网网架中,最终实现配电网的等值建模。

1.1 配电网分布式光伏集群划分指标

本文根据最新实施的电力行业标准《电力系统仿真用电源聚合等值和建模导则》以及厂家型号对各分布式光伏进行了初次分群^[26]。

对于含有大规模分布式光伏的配电网来说,线路损耗是一个不可忽略的因素。若将两个具有相同逆变器但地理位置相隔很远的分布式光伏强行归为一类,等效线路损耗会产生较大误差。由于配电网的拓扑结构往往较复杂,且分布式光伏所在的接入点位置会对动态特性产生影响,本文在传统聚类指标的基础上,综合考虑各分布式光伏节点与 PCC 之间的电气距离,使与 PCC 距离相近的同一型

号分布式光伏被分到一个类别。以含有任意分布式电源的线性网络为例,当系统外部 k 点处发生短路故障后,各电源在短路点 k 处的电流响应取决于各电源电动势和电源节点与短路点 k 之间的阻抗,即转移阻抗^[27]:

$$\dot{I}_k = \sum_{i=1}^n \frac{\dot{U}_i}{Z_{ik}} \quad (1)$$

式中, \dot{I}_k 为短路点 k 处的电流交流分量值; \dot{U}_i 为第 i 个分布式电源的电压; Z_{ik} 为第 i 个分布式电源节点与短路点 k 间的转移阻抗; n 为分布式电源数量。

本文利用 K-means 聚类算法进一步根据电气距离划分初次分群后的同型号分布式光伏,形成综合考虑动态特性与电气距离的分布式光伏集群划分结果。

1.2 配电网分布式光伏聚合等值建模

本文按照“型号一致”与“功率守恒”两条原则进行机组聚合^[28]。在原有子集群中,相同型号的分布式光伏进行聚合等值,使得分布式光伏机组聚合前、后动态特性相对稳定。并且,配网与上级电网的 PCC 处功率需要保持一致,即满足以下条件:

$$\begin{cases} P_{\text{eq},\Omega} = \sum_{i=1}^{|\Omega|} P_i \\ Q_{\text{eq},\Omega} = \sum_{i=1}^{|\Omega|} Q_i \end{cases} \quad (2)$$

式中, $P_{\text{eq},\Omega}$ 为集群 Ω 对应的等值有功功率; P_i 为集群 Ω 中第 i 台分布式光伏的有功功率; $Q_{\text{eq},\Omega}$ 为集群 Ω 对应的等值无功功率; Q_i 为集群 Ω 中第 i 台分布式光伏的无功功率。

1.3 配电网网架等值建模

本文采用径向等效独立 (radial equivalent independent, REI) 法^[29] 构建等值机组/负荷与原有配电网分布式光伏接入点之间的等值网络。REI 法的基本思想是用一个等值的电源/负荷节点取代原有分散分布的电源/负荷节点,再通过一个无损耗的虚构网络连接等值的电源/负荷节点与原有配电网网架。由于分布式光伏运行时通常只对外发出有功功率,其 REI 网络主支路导纳可调整为

$$\begin{cases} y_u = \frac{P_{\text{eq}}}{U_u^2} \\ y_v = -\frac{P_v}{U_v^2} \end{cases} \quad (3)$$

式中, y_u 为干路导纳; y_v 为支路导纳; U_u 为等值接入点的电压; U_v 为原有接入点的电压; P_{eq} 为等值

功率; P_v 为原有接入点的功率。进行负荷等值时, 负荷功率的流动方向与电源相反, 须改变功率的正、负号。

完成 REI 网架构造后, 模型采用 Ward 等值法^[30]消去等值机组/负荷及 PCC 以外的多余节点, 完成网架等值。首先, 确定待保留和待消去的节点集, 本文的待保留节点为配电网内的等值电源/负荷接入点和 PCC, 配电网内的剩余节点均为待消去节点; 其次, 构建配电网的节点电压方程, 定义等值电源/负荷接入点为边界节点集, PCC 为内部节点集, 待消去节点为外部节点集; 最后, 消去外部节点集, 得到仅包含边界节点集和内部节点集的 Ward 等值网络。配电网化简后的节点导纳矩阵如下:

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_B \\ \dot{I}_I \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{BB} - Y_{BE}Y_{EE}^{-1}Y_{EB} & -Y_{BE}Y_{EE}^{-1}Y_{EI} \\ -Y_{IE}Y_{EE}^{-1}Y_{EB} & Y_{II} - Y_{IE}Y_{EE}^{-1}Y_{EI} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_B \\ \dot{U}_I \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中, 下标 B 表示边界节点, I 表示内部节点, E 表示外部节点; Y 为节点导纳矩阵; \dot{U} 为节点电压矩阵; \dot{I} 为节点电流矩阵。

综上所述, 本文基于机组型号和电气距离的集群划分方法进行了同一子集群分布式光伏的聚合等效, 构建了等值电源、等值负荷与 PCC 三者之间的等值网络, 形成了配电网分布式光伏等值模型。

2 高渗透率分布式光伏配电网宽频振荡分析方法

2.1 高渗透率分布式光伏配电网宽频振荡机理

在高渗透率分布式光伏配电网中, 大量电力电子设备引起的宽频振荡问题是多类型设备、多时间尺度相互作用的复杂系统问题。分布式光伏的控制主要依靠灵活的电力电子设备, 而电力电子设备及其控制系统、锁相环等与交直流电网中的电抗和电容相互作用, 使电力电子设备与系统之间进行了多次非基频下的能量交换, 从而引起振荡频率高于低频振荡的宽频振荡^[14]。同时, 高比例分布式光伏接入后, 电网中存在大量电力电子开关控制的功率转换系统。为了提高能量转换效率, 开关频率逐步提高, 引起了频率为 2~9 kHz 的高次谐波振荡。电力系统中各设备之间的时间尺度相差较大, 若不采取相应抑制措施, 谐波发生后会引起各电气量在不同时间尺度内的振荡。因此, 高渗透率分布式光伏配电网的宽频振荡机理的本质为谐波源在小阻尼或负阻尼系统中因无法衰减而产生的等幅或增

幅振荡。

配电网本身是具有强非线性的复杂系统, 电力电子设备的应用进一步增强了系统的非线性。含高渗透率分布式光伏的配电网与主网之间的宽频振荡不再是各子系统相互叠加的结果, 因此本文将配电网视为一个整体, 考虑其阻抗特性对主网的影响, 利用二者的阻抗比判断系统的稳定性。

2.2 宽频振荡阻抗特性分析

2024 年最新实施的国家标准《高压直流输电用电压源换流器交流侧阻抗设计及测试方法》(GB/T 43534—2023) 明确了基于阻抗的稳定性分析方法是分析电气振荡的有效方法之一, 阻抗测试方法包括: 谐波电压注入法和谐波电流注入法^[30]。主网的电压相对稳定, 采用谐波电流注入法无法采集产生的谐波电压信号, 所以本文通过谐波电压注入法进行扫频, 即从主网侧向配网侧注入谐波电压源。上述标准中也规定了谐波电压源的幅值宜大于并网点额定电压的 1%, 小于并网点额定电压的 5%, 采集相电压和电流信号, 并进行正负序分离和傅里叶分解处理。针对注入的谐波频率, 将电压幅值除以电流幅值获得阻抗幅值, 将电压相位减去电流相位获得阻抗相位, 改变注入的谐波电压频率, 重复上述步骤直至完成所要求频率范围的扫频。

本文结合上述相关行业标准, 提出了基于高渗透率分布式光伏配电网阻抗特性的宽频振荡分析思路: 首先, 在满足参数要求的情况下, 采用扫频法获取等值模型各个频段的阻抗幅值和相位, 即阻抗特性; 其次, 分别通过奈奎斯特图和伯德图更加直观地进行系统稳定性分析; 最后, 基于阻抗特性完成宽频振荡风险评估和频段确认这两个方面的研究。

2.2.1 基于阻抗特性的宽频振荡风险评估

为了获得判断电力系统稳定性的奈奎斯特曲线, 需要建立主网和配网的等效模型, 配电网中的分布式光伏通常处于最大功率点跟踪模式(maximum power point tracking, MPPT)或跟随调度指令处于有功/无功功率控制模式。上述模式即电流控制模式, 均须快速、精确地调节新能源机组并网电流幅值和相位。在此类模式下, 分布式光伏集群交流端口呈现电流源特性, 还具有输出阻抗。将配网交流端口等效为理想电流源 I_{RE} 与其端口阻抗 Z_{RE} 并联, 其中 I_{RE} 与 Z_{RE} 可根据配网等值模型阻抗建模获取。此外, 可以将等值模型并网点处的主网等效为理想电压源 V_g 与交流电网阻抗 Z_g 串联^[31]。

基于上述分析, 本文建立了如图 1 所示的系统

端口等值模型。配网输出节点的电压方程如下:

$$\begin{cases} V_{\text{out}} = (I_{\text{RE}} - I_{\text{out}}) Z_{\text{RE}} \\ V_{\text{out}} = V_{\text{g}} + Z_{\text{g}} I_{\text{out}} \end{cases} \quad (5)$$

式中, V_{out} 为配网输出电压; I_{out} 为配网输出电流。

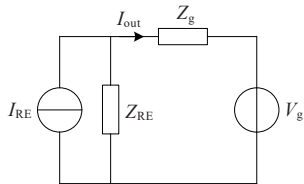


图 1 系统端口等效模型

Figure 1 Equivalent model of system port

由式(5)可得其配网输出电流 I_{out} 为

$$I_{\text{out}} = \frac{Z_{\text{RE}} I_{\text{RE}} - V_{\text{g}}}{Z_{\text{RE}} + Z_{\text{g}}} \quad (6)$$

将式(6)进行整理,可得:

$$I_{\text{out}} = \left(I_{\text{RE}} - \frac{V_{\text{g}}}{Z_{\text{RE}}} \right) \frac{1}{1 + \frac{Z_{\text{g}}}{Z_{\text{RE}}}} \quad (7)$$

式中,等号右侧可视为两个闭环传递函数相乘,分别记为

$$\begin{cases} F_1 = I_{\text{RE}} - \frac{V_{\text{g}}}{Z_{\text{RE}}} \\ F_2 = \frac{1}{1 + \frac{Z_{\text{g}}}{Z_{\text{RE}}}} \end{cases} \quad (8)$$

等值模型经交流送出系统的稳定性由闭环传递函数 F_1 和 F_2 共同决定:当且仅当 F_1 与 F_2 的极点均位于 s 平面的左半平面时,系统稳定,即

$$\begin{cases} \lim_{s \rightarrow p_i} F_1(s) = \infty, \text{Re}[p_i] < 0 \\ \lim_{s \rightarrow p_i} F_2(s) = \infty, \text{Re}[p_i] < 0 \end{cases} \quad (9)$$

式中, p_i 为 $F(s)$ 的极点。

闭环传递函数 F_1 所有极点均位于 s 平面的左半平面,即接入的理想交流电网的输出电流稳定。闭环传递函数 F_2 的所有极点均位于 s 平面的左半平面,该负反馈回路稳定,即开环传递函数 $Z_{\text{g}}/Z_{\text{RE}}$ 满足奈奎斯特判据。以理想电网下稳定运行为既定条件,在此情况下, F_1 所有极点均位于 s 平面的左半平面。系统稳定性仅取决于 F_2 ,即系统稳定的充分必要条件为交流电网阻抗 Z_{g} 与等值模型端口阻抗 Z_{RE} 的阻抗比 $Z_{\text{g}}/Z_{\text{RE}}$ 满足奈奎斯特判据,即

$$Z = P - N = 0 \quad (10)$$

式中, P 为传递函数在 s 平面的右半平面上的极点数目; N 为传递函数轨迹沿逆时针方向围绕点 $(-1, j0)$ 的次数。此外,引入最大峰值奈奎斯特判据^[31],即传递函数的奈奎斯特曲线越接近 $(-1, j0)$ 越不稳定,存在振荡风险。利用奈奎斯特图对阻抗特性进行分析可以实现电力系统的判稳,判稳的判据即上述奈奎斯特判据。

2.2.2 基于阻抗特性的宽频振荡频段确认

利用扫频法所得到的阻抗幅值和相位,可以较容易地画出对应的伯德图。在部分频段中,等值模型和交流电网阻抗特性幅值曲线相交,即

$$|Z_{\text{RE}}(f_0)| = |Z_{\text{g}}(f_0)| \quad (11)$$

式中, Z_{RE} 为等值模型阻抗, Z_{g} 为交流电网阻抗, f_0 为二者幅值相等时的频率。系统稳定性可以根据该频率所对应的二者相位之和进行判断。为方便阐述,本文将上述判断指标定义为相位稳定裕度:

$$\gamma = |\angle Z_{\text{RE}}(f_0) + \angle Z_{\text{g}}(f_0)| \quad (12)$$

当相位稳定裕度充足时,不存在振荡风险;当相位稳定裕度不足时,构成串联谐振回路,存在振荡风险,也可利用相位稳定裕度粗略地验证风险评估正确与否,即

$$\begin{cases} |Z_{\text{RE}}(f_0)| = |Z_{\text{g}}(f_0)| \\ \gamma > \gamma_0 \end{cases} \quad (13)$$

式中, γ_0 为系统稳定运行所要求的稳定裕度指标,当满足上述条件时,宽频振荡的风险较小。

基于上述分析,本文对接入交流电网开展了快速傅里叶变换(fast Fourier transform, FFT)分析,以证明阻抗特性的研究正确;利用伯德图对阻抗特性进行分析可以实现振荡频率的定位,振荡的频率为 f_0 。

3 算例仿真分析

为了验证本文所提基于等值模型阻抗特性的高渗透率分布式光伏配电网宽频振荡分析方法的有效性,首先,在 IEEE 33 节点配电网模型中开展基于等值模型分析的宽频振荡的可靠性验证,即保证等值前后模型的暂态特性一致;其次,在接入正常电网和弱电网两种不同主网条件的场景下进行稳定性分析;最后,在我国中部地区某省市 110 kV 区域配电网的实际等值模型中开展详细宽频振荡研究,并针对不同分布式光伏渗透率的情况进行分析。

3.1 等值模型可靠性验证

含有分布式光伏集群的 IEEE 33 节点模型如图 2 所示。本文根据配网的实际情况,在部分节点添加

了容量合适的分布式光伏。分布式光伏的相关参数如表1所示。该模型中共有9台分布式光伏以及32处负荷,总容量分别为 $1.08 \text{ MV}\cdot\text{A}$ 和 $(3.715+j2.3)\text{MV}\cdot\text{A}$ 。

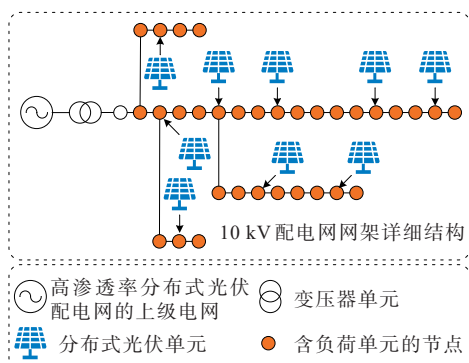


图2 含有分布式光伏集群的IEEE 33节点模型

Figure 2 IEEE 33 node model with distributed PV clusters

表1 分布式光伏的相关参数

Table 1 Distributed PV-related parameters

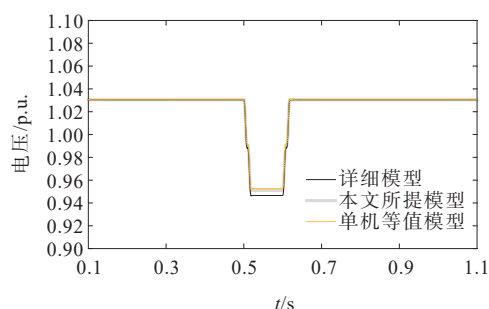
分布式光伏编号	容量/MW	接入节点编号
1	0.05	3
2	0.06	6
3	0.18	9
4	0.27	14
5	0.27	17
6	0.03	20
7	0.10	24
8	0.03	28
9	0.09	32

依据本文所提方法对上述9台分布式光伏进行等值,等值结果包含5台等值电源、1处等值负荷以及二者接入点和PCC之间的等值网架。

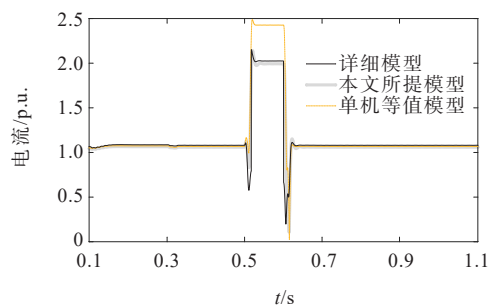
为验证本文所提等值模型的可靠性和准确性,本文在配电网系统外部设置Simulink的三相故障模块,在0.5 s时该线路某处发生三相短路故障,0.6 s时保护动作切除故障,故障下各模型的暂态响应曲线如图3所示。

图3展示了详细模型、本文所提等值模型和传统单机等值模型在故障下的暂态电压、电流响应曲线。当短路故障未发生时,配电网处于稳态运行过程;当外部发生永久性故障时,配电网受到故障扰动,PCC处呈现出电压跌落与电流振荡。由于综合考虑了分布式光伏与PCC的电气距离以及机组的动态特性,在稳态和暂态的情况下,本文所提等值模型的PCC电压、电流曲线与详细模型的曲线较为

贴合。此外,对各等值模型精度进行详细的量化分析,计算各等值模型相对于详细模型电压、电流仿真结果的均方误差值(root mean squared error, RMSE),RMSE越小代表各等值模型与详细模型仿真曲线之间的贴合程度越高,即仿真精度越高。故障下各模型仿真精度如表2所示,传统单机等值模型的电压和电流仿真精度RMSE均大于所提等值模型,说明本文所提等值模型在正常情况和故障情况下均具有较高的仿真精度,能够准确反映含大规模分布式光伏配电网的响应情况,验证了所提等值模型的可靠性和准确性。



(a)各模型PCC电压仿真结果



(b)各模型PCC电流仿真结果

图3 故障下各模型的暂态响应曲线

Figure 3 Transient response curves of each model under fault state

表2 故障下各模型仿真精度

Table 2 Simulation accuracy of each model under fault state

模型	电压仿真精度 RMSE	电流仿真精度 RMSE
单机等值模型	0.001 093	0.092 281
本文所提模型	0.000 962	0.022 287

3.2 宽频振荡分析

3.2.1 算例1:IEEE 33节点配电网模型

为了全面分析不同强度的交流主网系统对配电网宽频振荡的影响,本文引入了系统短路比(short-circuit ratio, SCR)的概念,SCR即主网短路容量 S_{sc} 与配网额定功率 S_N 之比:

$$S_{SCR} = \frac{S_{ac}}{S_N} \quad (14)$$

根据 SCR 的大小区分不同交流主网系统的强度,在接入正常电网和弱电网两种不同主网条件的场景下进行稳定性分析。

1) 接入正常交流电网(SCR较大)。

设置正常交流电网 SCR 为 3.7,交流电网阻抗标幺值为 $j0.773 \text{ p.u.}$ 。在分布式光伏集群所在区域的并网节点处,设置一个可控电压谐波源,幅值为 15 V,在 1~10 000 Hz 按照对数间隔设定电压源的频率,并测量模型响应的电流信号,通过二者信号计算得到详细模型、传统单机等值模型和本文所提等值模型在 PCC 的阻抗特性。IEEE 33 模型的扫频对比结果如图 4 所示。

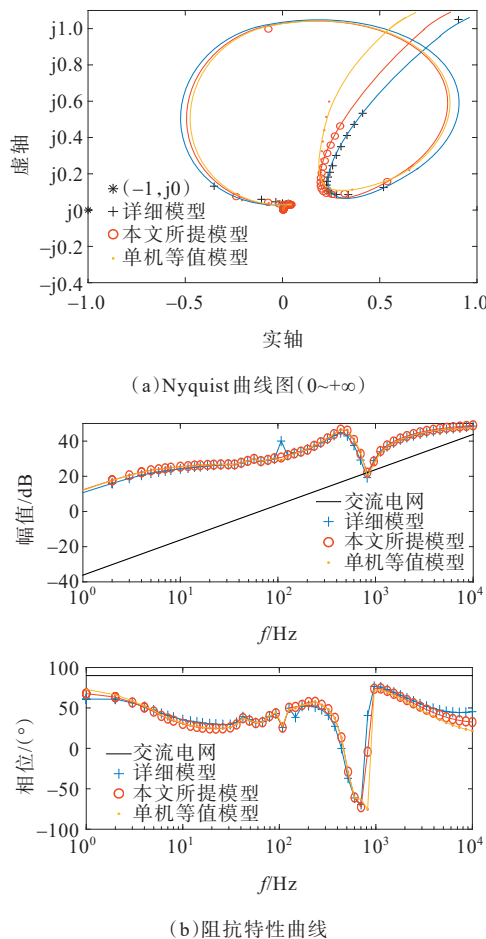


图 4 IEEE 33 模型的扫频对比结果
Figure 4 Frequency sweep comparison results of IEEE 33 model

本文针对接入正常交流电网下的各模型扫频曲线进行分析,通过扫频法得到等值模型的系统奈奎斯特曲线,并与详细模型的系统奈奎斯特曲线进行对比。由图 4(a)可知,相较于传统单机等值模

型,本文所提等值模型能够更好地拟合详细模型曲线,验证了基于等值模型研究宽频振荡的可靠性以及进行电力系统判稳的准确性。而由 IEEE 33 节点配电网模型接入正常电网时系统满足奈奎斯特判据可知,系统不存在宽频振荡风险。

等值模型和详细模型在并网节点的阻抗特性如图 4(b)所示。本文所提等值模型可以很好地反映详细模型的阻抗特性,也验证了基于等值模型研究宽频振荡的可靠性以及进行振荡频率定位的准确性。

2) 接入弱交流电网(SCR较小)。

类比接入正常交流电网的情况,本文在接入弱交流电网的情况下也同步进行了各模型的扫频实验。设置故障时弱交流电网 SCR 为 0.6,交流电网阻抗标幺值为 $j4.765 \text{ p.u.}$ 。在分布式光伏集群所在区域的并网节点处,设置一个可控电压谐波源,幅值为 15 V,在 1~10 000 Hz 按照对数间隔设定电压源的频率,并测量模型响应的电流信号,通过二者信号计算得到等值模型和详细模型在 PCC 的阻抗特性。结合实验结果可知,所提等值方法在不同场景下均具有较高的精度。

接入弱交流电网时,各等值模型的扫频结果如图 5 所示。由图 5(a)可知,通过扫频法得到的各等值模型的系统奈奎斯特曲线皆不满足奈奎斯特判据,系统存在宽频振荡风险。等值模型在并网节点的阻抗特性曲线如图 5(b)所示,根据本文所提等值模型的阻抗特性曲线分析可知,在 100~1 000 Hz 的部分频段内,配电网阻抗呈现容性,配电网阻抗与交流电网阻抗在 703 Hz 幅值相交,此时相位稳定裕度为 7.43° ,对于 IEEE 33 节点系统而言稳定裕度不足,存在振荡风险,将发生 703 Hz 振荡;根据传统单机等值模型的阻抗特性曲线分析可知,在 822 Hz 处相位稳定裕度较小,而配电网阻抗与交流电网阻抗在 703 Hz 幅值相交,此时相位稳定裕度为 16.81° ,稳定裕度充足,不存在振荡风险。

为了判断上述分析的准确性,本文对接入 SCR 为 0.6 的弱交流电网的场景开展时域仿真,在配网侧加入各个频段的谐波,当谐波频率为 705 Hz 时,振荡比较明显,振荡波形及 FFT 结果如图 6 所示。由图 6(a)可知,并网电流波形振荡明显。FFT 结果如图 6(b)所示,可知接入弱交流电网时会发生 705 Hz 振荡,仿真结果与本文根据所提等值模型的频域分析一致,验证了基于该等值模型进行宽频振荡分析的正确性。

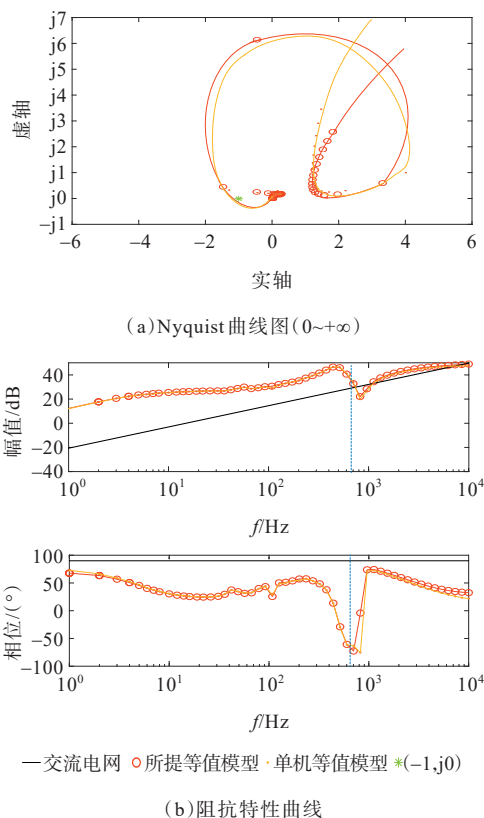
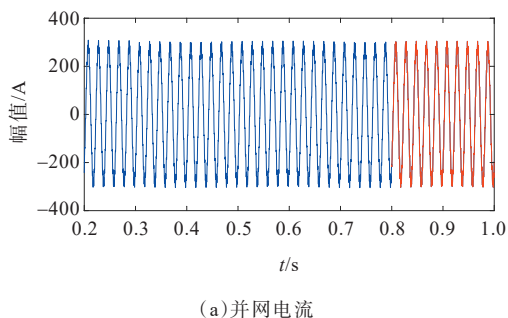
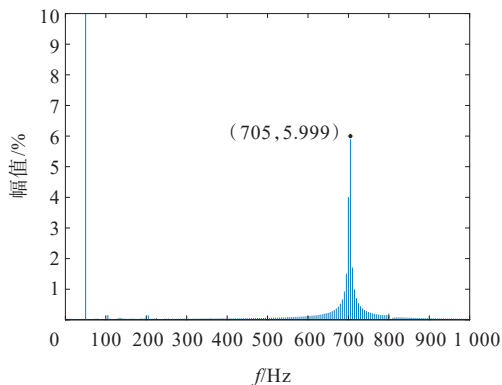


图 5 接入弱交流电网时的各等值模型的扫频结果

Figure 5 Frequency sweep results of each equivalent model when connected to a weak alternating current power grid



(a) 并网电流



(b) FFT 结果(50 Hz 基频分量为 282.4 A, 总谐波失真为 7.93%)

图 6 接入弱交流电网时的振荡波形及 FFT 结果

Figure 6 Oscillation waveform and FFT results when connected to a weak alternating current power grid

综上所述,本文所提等值模型在两种不同主网条件的场景下均能够准确反映含大规模分布式光伏接入配电网的阻抗特性,基于等值模型的宽频振荡分析也符合详细模型的仿真结果。

3.2.2 算例 2: 实际配电网模型

本文基于我国中部地区某省市 110 kV 区域配电网的详细数据开展研究,该配电网包含 3 种类型,共计 592 台分布式光伏以及 91 处负荷,分布式光伏与负荷均采用典型参数模型,总容量分别为 60.963 6 MV·A 和 (85.22+j37.68)MV·A。根据本文所提方法在 Simulink 中建立该配电网的等值模型,包含 6 台等值电源、1 处等值负荷以及等值电源、负荷接入点、PCC 之间的等值网架。在正常运行场景下,按照相关定义,该配电网为区域电网中较小的组成部分,主网短路容量较大,设置该主网 SCR 为 10,主网阻抗标幺值为 j27.001 p.u。在 110 kV 区域配电网并网点下一级的变压器后,设置一个可控电压谐波源,幅值为 15 V,在 1~10 000 Hz 按照对数间隔设定电压源的频率,测量模型响应的电流信号,通过计算得到各频率的阻抗,并分析等值模型在 PCC 的阻抗特性。

本文类比 IEEE 33 节点模型中的宽频振荡研究,在 110 kV 区域配电网中也同步进行了等值模型的扫频实验。110 kV 区域配电网等值模型的扫频结果如图 7 所示。由图 7(a)可知,曲线满足奈奎斯特判据,该 110 kV 区域配电网现阶段不存在宽频振荡风险;等值模型在并网点的阻抗特性曲线如图 7(b)所示,在 1~10 000 Hz 全频段内,该配电网阻抗呈现感性,而主网阻抗也呈现感性,无法形成串联谐振,从而验证了上述风险评估的结果。

根据上述算例分析,虽然该配电网目前没有产生宽频振荡的风险,但是在未来以新能源为主体的电力系统中,分布式光伏通常须按照规划扩建,而在相同的网架结构下,不同的分布式光伏渗透率将对配电网的阻抗特性以及并网稳定性产生影响。光伏渗透率被定义为光伏发电量和总能源消费量之比。本文选取了 3 种光伏渗透率的场景获得其阻抗特性曲线,分别为 95%、80% 和 65%。

不同光伏渗透率下的 110 kV 区域配电网阻抗特性如图 8 所示。由图 8 可知,当分布式光伏渗透率变大时,幅值的基本走势没有太大变化,但是会有更多的频段中相位为负,等值阻抗频率特性呈现容性,而在非线性负载以及线路阻抗的共同作用下,实际应用中的交流电网稍感性。当分布

式光伏渗透率较小时,配电网对外呈现感性,和主网不会产生串联谐振;当分布式光伏渗透率较大时,配电网在部分频段对外呈现容性,容易构成串联谐振回路,主网和配网二者发生宽频振荡的可能性相应变大,具体情况可由本文所提方法进行分

此外,当发生主网短路故障时,交流系统短路容量变小,主网SCR变小,电网等值阻抗变大,由本文算例分析可知,系统有发生宽频振荡的风险;对于负荷而言,随着冲击性工业、电气化轨道交通、电动汽车充电站等新型负载的大量接入,非线性负载产生的谐波呈现出含量显著增大、频率范围显著拓宽、整数次谐波和间谐波共存的特征,而由于高渗透率分布式光伏配电网等值模型的阻抗频率特性部分频段变成容性,负荷谐波无法抑制,将汇聚到PCC后输入主网,对电力系统的稳定性产生影响。

综上所述,本文所提等值模型在不同场景下均能准确反映含大规模分布式光伏接入配电网的阻抗特性,且基于等值模型的宽频振荡研究也符合实际模型的宽频振荡现象。

4 结 语

针对高渗透率分布式光伏配电网宽频振荡复杂、仿真分析难等问题,本文采用了合理精细的集群划分和聚合等值方法,提出了基于等值模型的高渗透率分布式光伏并网下宽频振荡分析方法,进行了仿真验证,结论如下。

1)根据分布式光伏暂态响应的理论分析以及相关行业标准,将实际配电系统宽频振荡问题分解为聚合等值和稳定性分析,为解决配电网宽频振荡问题提供了新的研究思路。

2)提出了基于动态特性与电气距离的分布式光伏集群划分方法,并进行了可靠性验证。结果表明,该方法分群流程便捷,能够较好地应用于工程实际,且能够准确反映高渗透率分布式光伏并网下的暂态响应情况。

3)提出了基于阻抗特性的宽频振荡分析方法,并在此基础上进行了宽频振荡的风险评估和频段确认。仿真算例结果表明,本文所提方法和指标能够准确反映高渗透率分布式光伏配电网的宽频振荡风险,加快了获得系统阻抗特性的速度,提高了研究宽频振荡问题的计算效率。

本文所提基于等值模型的高渗透率分布式光伏并网下的宽频振荡分析方法,主要面向主网和配网相对固定的网架结构和机组配置,而实际现场中的主网故障、电网结构变化、负荷谐波源、分布式光伏机组参数和运行方式的变化、振荡频率耦合机理等因素都会对电力系统是否发生宽频振荡造成影响。如何综合考虑不同因素,提出相应的配电网分布式光伏宽频振荡风险量化体系,将是未来的研究方向。

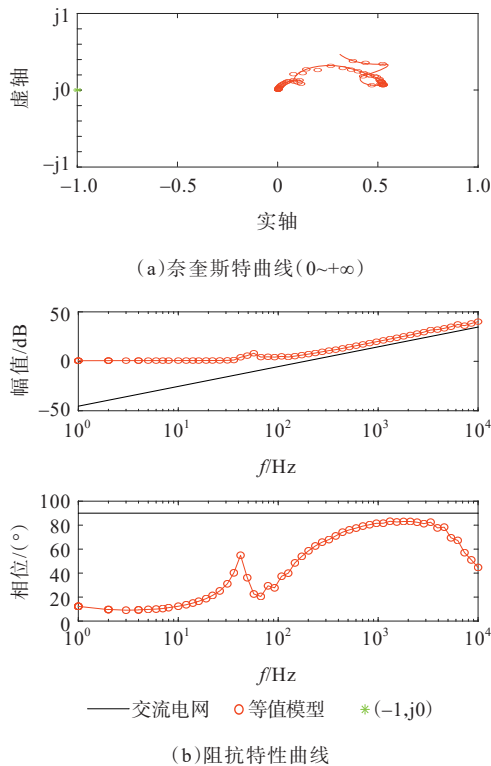


图 7 110 kV 区域配电网等值模型的扫频结果

Figure 7 Frequency sweep results of equivalent model of 110 kV regional distribution network

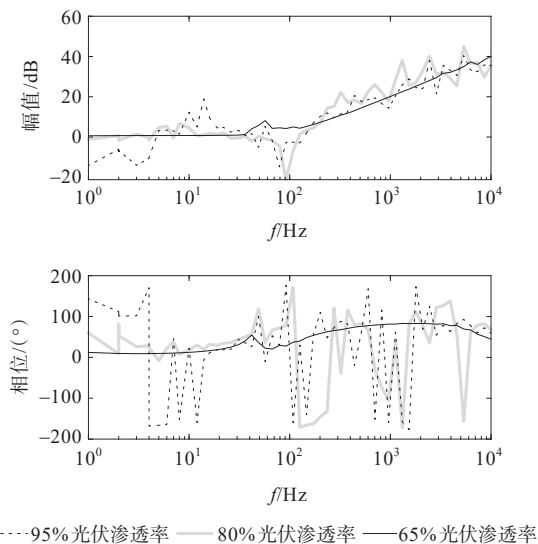


图 8 不同光伏渗透率下的 110 kV 区域配电网阻抗特性

Figure 8 Impedance characteristics of 110 kV regional distribution network with different PV penetration rates

参考文献:

- [1] 黎博, 陈民铀, 钟海旺, 等. 高比例可再生能源新型电力系统长期规划综述[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(2): 555-581.
LI Bo, CHEN Minyou, ZHONG Haiwang, et al. A review of long-term planning of new power systems with large share of renewable energy[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(2): 555-581.
- [2] TONG D, FARNHAM D J, DUAN L, et al. Geophysical constraints on the reliability of solar and wind power worldwide[J]. Nature Communications, 2021, 12(1): 6146.
- [3] 张爱军, 刘会强, 慕腾, 等. 计及经济-低碳时空匹配的高比例新能源电力系统扩展规划[J]. 智慧电力, 2024, 52(11): 72-80.
ZHANG Aijun, LIU Huiqiang, MU Teng, et al. Expansion planning for high proportion of renewable energy power system considering economy-low carbon spatiotemporal matching[J]. Smart Power, 2024, 52(11): 72-80.
- [4] LIU Q Y, LIU F, ZOU R M, et al. Harmonic resonance characteristic of large-scale PV plant: modelling, analysis, and engineering case[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2022, 37(3): 2359-2368.
- [5] 段庚勇, 冯琳, 李国杰. 考虑集电网结构的海上风电场谐振研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(22): 1-11.
DUAN Gengyong, FENG Lin, LI Guojie. Research on resonance of offshore wind farm considering electricity collection system[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(22): 1-11.
- [6] 相晨萌, 高树国, 刘宏亮, 等. 基于宽频振动传感器的电力设备状态监测方法可行性分析[J]. 高压电器, 2024, 60(4): 83-91.
XIANG Chenmeng, GAO Shuguo, LIU Hongliang, et al. Feasibility analysis of power equipment condition monitoring method based on broadband vibration sensor [J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(4): 83-91.
- [7] 吴琛, 刘威, 张丹, 等. 基于宽频振荡稳定约束的风电接入容量分析[J]. 电力建设, 2023, 44(2): 83-91.
WU Chen, LIU Wei, ZHANG Dan, et al. Wind power penetration capacity analysis based on wide-band oscillation constraint[J]. Electric Power Construction, 2023, 44(2): 83-91.
- [8] 兰月, 王俊芳, 窦宇宇, 等. 一种抑制风电送出直流 MMC 内部振荡的零序电流控制策略研究[J]. 电力科学与技术学报, 2024, 39(1): 234-242.
LAN Yue, WANG Junfang, DOU Yuyu, et al. Research on zero sequence current control strategy for suppressing internal oscillation of DC MMC send by wind power[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, 39(1): 234-242.
- [9] 蔡晖, 郭瀚临, 张文嘉, 等. 电力电子化受端省级电网宽频谐振稳定性研究[J]. 电源学报, 2024, 22(增刊1): 159-165+207.
CAI Hui, GUO Hanlin, ZHANG Wenjia, et al. Research on broadband resonance stability of receiving-end provincial power grid with high penetration of power electronic devices[J]. Journal of Power Supply, 2024, 22(S1): 159-165+207.
- [10] 雷傲宇, 汪林光, 梅勇, 等. 多端柔性直流电网的中高频振荡特性分析[J]. 电网与清洁能源, 2023, 39(7): 54-60.
LEI Aoyu, WANG Linguang, MEI Yong, et al. An analysis of medium & high-frequency oscillation characteristics in multi-terminal flexible HVDC networks [J]. Power System and Clean Energy, 2023, 39(7): 54-60.
- [11] 李亚楼, 张星, 胡善华, 等. 含高比例电力电子装备电力系统安全稳定分析建模仿真技术[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(10): 33-42.
LI Yalou, ZHANG Xing, HU Shanhua, et al. Modeling and simulation technology for stability analysis of power system with high proportion of power electronics[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(10): 33-42.
- [12] 吴翔宇, 张晓红, 许寅, 等. 微电网(群)宽频振荡分析和抑制研究进展与展望[J]. 电网技术, 2023, 47(9): 3727-3745.
WU Xiangyu, ZHANG Xiaohong, XU Yin, et al. Research progress and prospect of wide-band oscillations analysis and suppression for microgrid (clusters) [J]. Power System Technology, 2023, 47(9): 3727-3745.
- [13] 王渝红, 王馨瑶, 廖建权, 等. 交直流电网宽频振荡产生、辨识及抑制研究综述[J]. 高电压技术, 2023, 49(8): 3148-3162.
WANG Yuhong, WANG Xinyao, LIAO Jianquan, et al. Review of generation, identification and suppression of wide-band oscillation in AC-DC power system[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(8): 3148-3162.
- [14] 马宁宁, 谢小荣, 贺静波, 等. 高比例新能源和电力电子设备电力系统的宽频振荡研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(15): 4720-4732.
MA Ningning, XIE Xiaorong, HE Jingbo, et al. Review of wide-band oscillation in renewable and power electronics highly integrated power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(15): 4720-4732.
- [15] 国家电网有限公司. 电力系统宽频测量装置技术规范: Q/GDW 12214—2022[S]. 2022.
State Grid Corporation of China. Technology specifications of power system wide-frequency measurement device: Q/GDW 12214—2022[S]. 2022.

- [16] 苏晨博. 大规模风电场并网引发系统宽频振荡的机理分析及抑制措施[D]. 北京: 华北电力大学, 2022.
SU Chenbo. Mechanism analysis and suppression method of broadband oscillation caused by large-scale grid connection wind farm[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2022.
- [17] 于家英. 光伏并网系统宽频振荡特性研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2021.
YU Jiaying. Research on broadband oscillation characteristics photovoltaic grid connected system[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2021.
- [18] 曾志杰. 并网逆变器DQ阻抗模型的建立方法研究[D]. 南京: 东南大学, 2021.
ZENG Zhijie. Research on DQ impedancemodelling method ofgrid-tied inverters[D]. Nanjing: Southeast University, 2021.
- [19] 王军. 带分布式发电的配电网谐波研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院电工研究所, 2006.
WANG Jun. Harmonic research of the distribution network with distributed generation[D]. Beijing: Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences, 2006.
- [20] 谢秉鑫, 王宗, 范士林. 分布式电源对于配电网谐波特性的影响[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(2): 116-119+130.
XIE Bingxin, WANG Zong, FAN Shilin. Influence on harmonic characteristics of distributed network with distributed generations[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(2): 116-119+130.
- [21] 徐方维, 曾雪, 王川, 等. 基于最小范数的系统侧谐波变阻抗求解技术[J]. 电力工程技术, 2023, 42(6): 110-116.
XU Fangwei, ZENG Xue, WANG Chuan, et al. Solution technology of system side harmonic variable impedance based on minimum norm[J]. Electric Power Engineering Technology, 2023, 42(6): 110-116.
- [22] LI P X, GU W, WANG L F, et al. Dynamic equivalent modeling of two-staged photovoltaic power station clusters based on dynamic affinity propagation clustering algorithm[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2018, 95: 463-475.
- [23] LI P X, GU W, LONG H, et al. High-precision dynamic modeling of two-staged photovoltaic power station clusters[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(6): 4393-4407.
- [24] ZHU L, HU X G, LI S Y. High-frequency resonance of DFIG-based wind generation under weak power network [C]//2018 International Conference on Power System Technology (POWERCON). Guangzhou, China. IEEE, 2018: 2719-2724.
- [25] 谢宇哲, 王杨, 贺艳华, 等. 面向宽频段谐振分析的集中式光伏电站单机等值模型适用性分析[J]. 热力发电, 2024, 53(4): 9-18.
XIE Yuzhe, WANG Yang, HE Yanhua, et al. Applicability analysis of single-unit equivalent model of centralized photovoltaic power station for wide-band resonance[J]. Thermal Power Generation, 2024, 53(4): 9-18.
- [26] 国家能源局. 电力系统仿真电源聚合等值和建模导则: DL/T 2671—2023[S]. 北京: 中国电力出版社, 2023.
National Energy Administration. Guidelines on aggregated equivalent and modeling of power plant for power system: DL/T 2671—2023[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2023.
- [27] 李庚银. 电力系统分析基础[M]. 北京: 机械工业出版社, 2011.
LI Gengyin. Fundamentals of power system analysis[M]. Beijing: China Machine Press, 2011.
- [28] 叶林, 施媛媛, 王启亨, 等. 面向暂态分析的分布式光伏集群多步分群与等值建模[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(14): 72-81.
YE Lin, SHI Yuanyuan, WANG Qiheng, et al. Multi-step grouping and equivalent modeling of distributed photovoltaic clusters for transient analysis[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(14): 72-81.
- [29] 诸骏伟. 电力系统分析—上册[M]. 北京: 中国电力出版社, 1995.
ZHU Junwei. Power system analysis-volume I[M]. Beijing: China Electric Power Press, 1995.
- [30] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 高压直流输电用电压源换流器交流侧阻抗设计及测试方法: GB/T 43534—2023[S]. 北京: 中国标准出版社, 2023.
State Administration for Market Regulation, National Standardization Administration. Design and testing methods for AC side impedance of voltage source converter based high voltage direct current(VSC-HVDC) transmission: GB/T 43534—2023[S]. Beijing: Standards Press of China, 2023.
- [31] 王伟胜, 李光辉, 何国庆, 等. 新能源并网系统宽频振荡分析与抑制[M]. 北京: 中国电力出版社, 2022.
WANG Weisheng, LI Guanghui, HE Guoqing, et al. Analysis and mitigation of broadband oscillation in renewable energy generation and AC/DC transmission systems[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2022.