

基于多次密度空间聚类算法的多逆变器并网同步稳定物理表征

范宏¹, 彭瑞¹, 张树卿², 唐绍普²

(1. 上海电力大学电气工程学院, 上海 200090; 2. 电力系统及发电设备控制和仿真国家重点实验室(清华大学), 北京 100084)

摘要: 新能源电源通过逆变器实现并网, 其并网系统的电压幅值、相位、频率等物理量在电磁、机电等多时间尺度均存在强交互耦合, 准确把握并网逆变器的同步稳定主导行为特征是目前热点问题。为此, 提出了一种多次密度空间聚类(density-based spatial clustering of applications with noise, DBSCAN)算法来分析多逆变器并网系统同步稳定的物理表征。首先建立了跟网型和构网型逆变器并网模型, 分析了其同步控制单元的同步特性; 其次利用所提算法实现对并网逆变器与公共连接点的相位差、逆变器功角、系统频率等仿真数据的聚类和分类; 最后通过仿真分析表明, 逆变器并网系统同步稳定特征表现为功角逐步恢复原来运行状态和新稳态, 此外, 系统同步稳定与频率稳定具有一致性。区别在于跟网型同步控制单元成功锁相可以表征其系统的同步稳定, 而构网型同步控制单元无法表征。

关键词: 逆变器; 跟网型控制; 构网型控制; 同步稳定; 密度空间聚类

Physical Characterization of Grid-Connected Synchronous Stability of Multiple Inverters Based on Multiple Density Spatial Clustering Algorithm

FAN Hong¹, PENG Rui¹, ZHANG Shuqing², TANG Shaopu²

(1. Department of Electrical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China; 2. State Key Laboratory of Control and Simulation of Power System and Generation Equipments, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The new energy source is connected to the grid through the inverter, and the voltage amplitude, phase, frequency and other physical quantities of the grid-connected inverter system have strong interactive coupling in electromagnetic, electromechanical and other time scales. It is a hot issue to accurately grasp the dominant behavior characteristics of synchronous stability of grid-connected inverters. Therefore, a multiple density-based spatial clustering of applications with noise (DBSCAN) algorithm is proposed to analyze the physical characterization of the synchronous stability of grid-connected multi-inverter systems. Firstly, the grid-connected models of grid-following inverters and grid-forming inverters are established, and the synchronization characteristics of their synchronous control units are analyzed. Secondly, the proposed algorithm is used to cluster and classify simulation data of the phase difference between the grid-connected inverter and the common connection point, the inverter power angle, the system frequency and so on. Finally, the simulation analysis shows that the power angle of the grid-connected inverter system is gradually restored to the original operating state and the new steady state. In addition, the system synchronization stability is consistent with the frequency stability. The successful phase locking of the grid-following inverters synchronous control unit can characterize the synchronization stability of the system, while the grid-forming inverters synchronous control unit cannot.

Key words: inverter; grid-following control; grid-forming control; synchronization stability; density spatial clustering

0 引言

随着大规模新能源接入电网,我国电力系统正向含高比例新能源和高比例电力电子设备的新型电力系统转变^[1-3]。目前,在以新能源为主体的新型电力系统的构建过程中,以交流电技术为基础的电力系统特征在较长一段时间内不会改变,同步稳定依然是新型电力系统运行的基础。大多数新能源电源通过逆变器并网,其同步稳定机制与传统同步发电机具有本质差别^[4-5]。传统同步发电机通过维持转子的同步转速实现同步^[6],动态变化慢,频带窄^[7],系统同步表现为机电暂态时间尺度下多刚体相对运动主导的“物理同步”。而新能源电源由电力电子控制主导^[8],响应速度快,惯性小^[9],其同步稳定过程由控制算法而非物理特性决定。这些差异深刻地改变着电网的动态行为,极大地影响了系统的同步稳定特性。

根据并网逆变器同步控制单元的控制结构,新能源电源并网可分为跟网型(grid-following, GFL)控制和构网型(grid-forming, GFM)控制^[10-11]。对新能源设备的研究主要采用小扰动同步动力学建模研究其稳定机理。针对GFL型逆变器并网的同步稳定研究包括:文献[12]采用基于频率耦合阻抗模型的方法给出GFL逆变器并网系统在不同电网阻抗下的稳定运行范围;文献[13-14]通过等面积法则研究GFL逆变器在不同输出电流和控制参数下单机并网系统的暂态失稳风险;文献[15]建立了GFL逆变器的系统小信号模型,研究发现弱电网下逆变器存在小干扰同步稳定问题。针对GFM型逆变器并网的同步稳定研究包括:文献[16]针对GFM逆变器并网的多输入多输出系统等效为两个单输入单输出系统来分别研究系统的幅相动力学模型;文献[17]通过定义逆变器的虚拟功角来描述GFM逆变器单机无穷大系统的同步稳定机理和失稳过程;文献[18]利用李亚普诺夫稳定性理论研究维持虚拟同步机(virtual synchronous generator, VSG)系统机电暂态稳定的输出阻抗边界。然而,新能源电源的大量接入增加了电力系统的不确定性和复杂性,但上述研究多基于单逆变器并网结构或特定场景下的同步稳定性分析,未考虑新能源电源通过电网非线性耦合作用可能涌现出的个体所不具备的同步问题,无法准确描述多逆变器并网的同步稳定特性,未能将

GFL型和GFM型新能源电源的并网同步稳定特性进行统一分析。

随着智能电网的建设和大数据技术的发展,电力系统已逐步进入大数据时代^[19-21],近年来不少国内外学者尝试利用数据挖掘技术来实现电力系统的安全稳定评估和新能源电源的运行特征筛选。文献[22]利用数据挖掘技术,从信息论的角度出发,提出了一种基于人工智能技术的两阶段电网关键稳定特征智能选择方法。文献[23]运用分类回归决策树算法来训练在线电压稳定裕度的评估规则,将电网的运行状态分为正常状态、警告状态和紧急状态。文献[24]利用对光伏阵列的实际数据分析来构造时间序列的相似性和偏差特征指标,从而表征不同的故障类型。文献[25]对电网的运行历史数据进行k-medoids聚类分析,提取暂态功角稳定故障的关键特征量,实现对严重故障的筛选。从上述研究可见,数据挖掘技术有利于提高电力系统安全稳定评估的速率和准确率,是提取新能源电源的稳定特征的有效手段。以控制策略主导的多新能源电源并网系统暂态过程速度快、饱和非线性特征显著、阶数高、计算复杂^[26-27]。因此可以借助数据挖掘技术在海量的仿真数据中筛选系统的同步稳定特征,弥补由于特定场景下新能源同步稳定特性的局限性,且受系统复杂度的影响小。

鉴于目前反应多逆变器并网系统的同步稳定主导状态变量还不明晰,同步稳定的机理、形态及特征难以辨析。为了准确把握多逆变器并网系统同步稳定的主导行为特征和规律,本文考虑了仿真数据的随机性和分布密度不均匀性,提出了一种多次DBSCAN聚类算法对多逆变器并网系统的批量仿真数据进行数据挖掘,进而分析该系统的同步稳定特性。首先,分析了GFL和GFM两种类型的并网逆变器同步控制单元的控制结构及其并网同步稳定的主要表现特征;其次,在MATLAB/Simulink仿真平台构建GFL和GFM多逆变器的组网仿真模型,并进行批量仿真,得到不同扰动下表征系统状态的各物理量的仿真数据集;最后采用所提的多次DBSCAN聚类算法提取多逆变器并网系统的同步稳定物理表征。

1 并网逆变器同步控制单元类型

1.1 GFL同步控制单元的控制结构

GFL同步控制单元的控制方法主要分为锁相环

(phase-locked loop, PLL) 同步控制和锁频环 (frequency-locked loop, FLL) 同步控制两类。由于 FLL 与 PLL 的非线性微分方程具有相似性, 在数学上具有等价性, 且考虑到 PLL 同步控制方法应用广泛, 因此, 本文采用 PLL 同步控制方法构建 GFL 同步控制单元。基于 PLL 同步控制单元的 GFL 并网控制结构如图 1 所示。

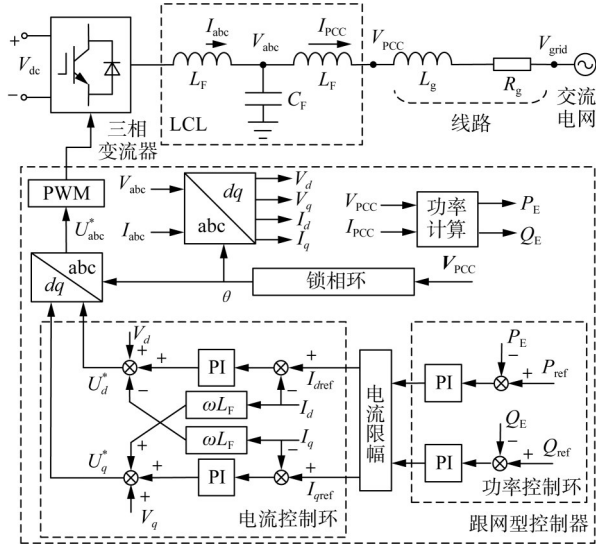


图 1 GFL 逆变器并网控制框图

Fig. 1 Grid-connected control block diagram of GFL inverter

GFL 并网逆变器主要控制环节包含同步控制单元、功率控制环和电流控制环。其中, PLL 同步控制单元的控制结构如图 2 所示。

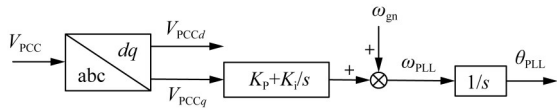


图 2 典型锁相环控制框图

Fig. 2 Typical PLL control block diagram

在同步坐标系下, 由图 1 可得:

$$V_{PCCq} = V_{Zq} + V_{gridq} \quad (1)$$

式中: V_{PCCq} 为并网公共连接点 (point of common coupling, PCC) 电压的 q 轴分量; V_{Zq} 和 V_{gridq} 分别为线路阻抗两端电压和电网电压的 q 轴分量。

根据图 2 中 PLL 的同步控制原理, θ_{PLL} 可表示为:

$$\theta_{PLL} = \int [\omega_{gn} + K_P \cdot V_{PCCq} + \int (K_I \cdot V_{PCCq}) dt] dt \quad (2)$$

式中: θ_{PLL} 为 PLL 检测到的相位角; ω_{gn} 为电网额定角频率; K_P 和 K_I 分别为 PI 调节器的比例增益和积

分增益。

GFL 逆变器与 PCC 的相位差 $\Delta\theta$ 如式 (3) 所示。

$$\Delta\theta = \theta_{PLL} - \theta_{PCC} \quad (3)$$

式中 θ_{PCC} 为 PCC 处电压的相位角。

定义逆变器功角 δ 为逆变器输出电压与电网电压的相位差, 即:

$$\delta = \theta_{PCC} - \theta_{grid} \quad (4)$$

式中 θ_{grid} 为电网电压的相位角。

由于

$$V_{gridq} = V_{grid} \sin(\theta_{grid} - \theta_{PLL}) \quad (5)$$

式中 V_{grid} 为交流电网电压。将式 (3) — (5) 代入式 (1) 可得:

$$V_{grid} \sin(\delta + \Delta\theta) = V_{Zq} - V_{PCCq} \quad (6)$$

当系统处于稳定运行状态下时, PLL 成功锁相, $\theta_{PLL} = \theta_{PCC}$, 此时 $\Delta\theta$ 和 V_{PCCq} 都为 0, 将其代入式 (6) 可得:

$$V_{grid} \sin \delta = V_{Zq} \quad (7)$$

由此可见, GFL 逆变器并网系统实现同步稳定的必要条件是 PLL 成功锁相, 即 $\Delta\theta=0$, 且在稳态下功角 δ 为定值。

1.2 GFM 同步控制单元的控制结构

GFM 同步控制单元的控制方法主要分为功率同步控制 (power synchronization control, PSC)、下垂控制、VSG 控制等同步控制方法。考虑到 GFM 同步控制在新能源电力系统中的应用尚不多见, 本文采用较为典型的下垂控制和 VSG 同步控制方法构建 GFM 同步控制单元。GFM 逆变器并网控制结构如图 3 所示, 相比 GFL 控制, GFM 控制增设电压环, 用于跟踪同步控制单元输出的 PCC 电压幅值及相位指令。不同于 PLL 被动地跟踪电网频率, GFM 并网逆变器通过如图 4 或如图 5 所示的同步控制单元主动建立频率。

GFM 同步控制单元的设计主要围绕模拟同步发电机的特性展开, 图 4 的下垂控制就是模拟同步发电机的有功功率-频率 (P-f)、无功功率-电压 (Q-V) 的下垂特性。下垂控制结构简单, 易实现, 但缺少惯量支撑, 在此基础上, 模拟同步发电机的转子运动和励磁特性建立图 5 所示的 VSG 控制结构, 使其具备等效惯量支撑和阻尼能力, 从而提高新能源电源的抗扰性能。

Q-V 和 P-f 的下垂控制方程如式 (8) — (9) 所示。

$$V_0 - V = n \cdot (Q_E - Q_{ref}) \quad (8)$$

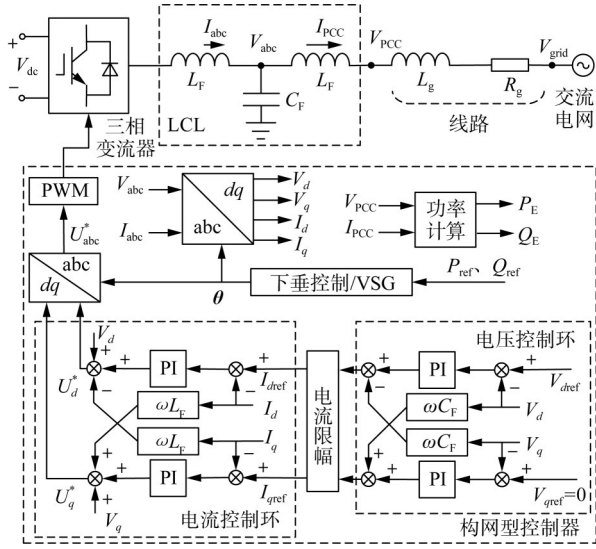


图3 GFM逆变器并网控制框图

Fig. 3 Grid-connected control block diagram of GFM inverter

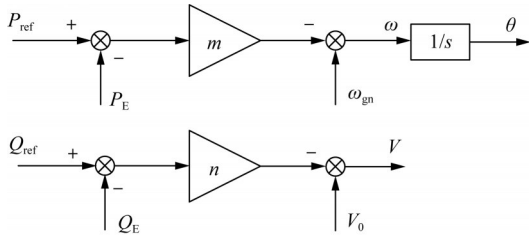


图4 下垂控制框图

Fig. 4 Droop control block diagram

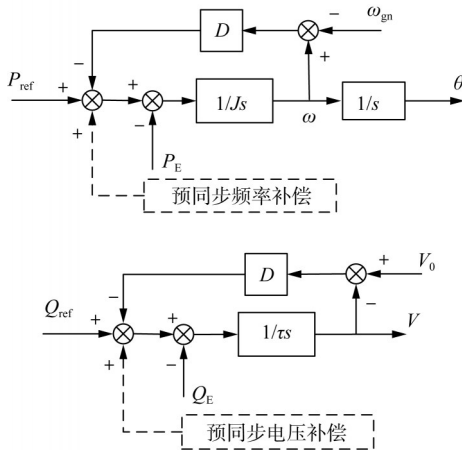


图5 VSG控制框图

Fig. 5 VSG control block diagram

$$\omega_{gn} - \omega = m \cdot (P_E - P_{ref}) \quad (9)$$

式中: V_0 为 Q-V 下垂控制的电压给定值; P_{ref} 和 Q_{ref} 分别为逆变器的有功功率与无功功率的给定值; m 和 n 分别为 P-f 和 Q-V 下垂控制系数; P_E 和 Q_E 分别为逆变器的输出有功功率和无功功率; ω 为逆变器

的角频率。

图 5 的 VSG 控制方程如式 (10) 所示。

$$\begin{cases} Jd\Delta\omega/dt + D(\omega - \omega_{gn}) = P_{ref} - P_E \\ \theta = \int \omega dt \end{cases} \quad (10)$$

式中 J 和 D 分别为虚拟惯量和虚拟阻尼系数。对比式 (9) — (10) 可知, 在外特性上, VSG 可以视为带有虚拟惯性的下垂控制逆变器。逆变器与电网的角频率差 $\Delta\omega$ 如式 (11) 所示。

$$\Delta\omega = \omega - \omega_{gn} = 2\pi(f - f_{gn}) \quad (11)$$

式中 f_{gn} 和 f 分别为电网频率和逆变器输出频率。在 GFM 逆变器并网前, 为了减少并网过程的电流冲击, 通常需要加入频率补偿模块和电压幅值补偿模块, 如图 5 中所示, 实现预同步控制, 使电源在并网前与电网同相位和电压同幅值。与 GFL 逆变器并网系统一样, GFM 逆变器与 PCC 的相位差 $\Delta\theta$ 和逆变器功角 δ 与式 (3) 和式 (4) 一致。

从上述两种类型的新能源电源的同步控制结构来看, 在 GFL 逆变器中, 并网同步可以认为是由对 q 轴电压的反馈控制来实现的; 在 GFM 逆变器中, 并网同步则是由对有功功率信号的反馈控制来实现的。两种控制类型逆变器并网的电压向量图可如图 6 所示。

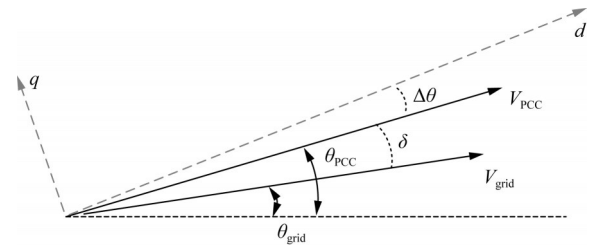


图6 逆变器并网系统的电压向量图

Fig. 6 Voltage vector diagram of inverter grid-connected system

在稳定状态下, $\Delta\theta = 0$, $\vec{V}_{PCC}$ 位于 d 轴上。若系统发生扰动, 暂态过程中两者不再相等, 在这种情况下逆变器的角频率 ω 将由于同步控制单元环节而改变, 使得旋转的 d 轴再次与 $\vec{V}_{PCC}$ 对准。从图 6 中可以看出与并网逆变器同步稳定密切相关的两个物理量是相位差 $\Delta\theta$ 和功角 δ 。

2 多次 DBSCAN 算法

2.1 DBSCAN 算法

DBSCAN 算法是一种典型的基于密度的聚类算

法,通过两个全局参数半径(E_{ps})和簇内最少样本的数量(M_{inpts})来识别数据集中有较高密度的样本点,并将其划分为簇。该算法首先将数据集 P 中的样本标记为未处理对象,对每个样本点计算半径为 E_{ps} 内点的集合,集合内个数多于或等于 M_{inpts} 的点标记为核心点,剩余的点如果在核心点的邻域内则被标记为边界点,并继续加入簇中,直到没有符合条件的点为止。如果数据中的某个点既不满足核心点的要求,也不满足边界点的要求,则该点被标记为噪声点。DBSCAN算法通过不断地重复上述过程,对仿真数据所有的点进行聚类。该算法的优点是可以基于固定的参数直接得到簇的数量,不同于基于距离函数的聚类算法,DBSCAN算法计算时的延展扩张特性可以在具有噪声的数据中识别任意形状的簇。

由于DBSCAN算法需要计算每个点之间的距离,在处理高维数据时,计算量较大,效率较低,因此需要对高维数据进行降维处理。而且算法聚类性能受参数 E_{ps} 和 M_{inpts} 的初值影响较大。通常在 M_{inpts} 初值的选择上有两种方法:一种是在数据点较少的情况下,设置 M_{inpts} 的初值为数据维度的两倍;另一种是在数据数量较多的情况下,设置 M_{inpts} 的初值为数据数量的1/25。在 M_{inpts} 初值确定的前提下,对于半径 E_{ps} 值的选取可利用 k -distance曲线图寻找距离突变点,即在该区间内曲线斜率最大的一个点。取突变点对应的距离(纵坐标)作为 E_{ps} 的初值。

DBSCAN算法也存在明显的缺点,该算法对 M_{inpts} 和 E_{ps} 两个值十分敏感,参数选择不当则可能导致一些点被错误地归为噪声点,也可能将两个距离较近的簇合并成一个簇。且当仿真数据分布较为随机时,往往会出现数据点密度分布不均匀的情况, k -distance图变得不再平滑,出现的距离突变点不止一个,此时仅靠单一的参数设置并不适用于区域内所有的簇。对于仿真数据密度分布不均匀的问题,本文提出了改变参数 E_{ps} 的多次DBSCAN聚类方法,以此来减少全局变量 E_{ps} 对聚类结果的影响,提升聚类结果的准确度。

2.2 多次DBSCAN算法的计算流程

为计及在大量扰动场景下所得的仿真数据密度分布不均匀性,以及多次DBSCAN计算产生较多的噪声点,本文所提的多次DBSCAN算法的详细计算流程如图7所示。

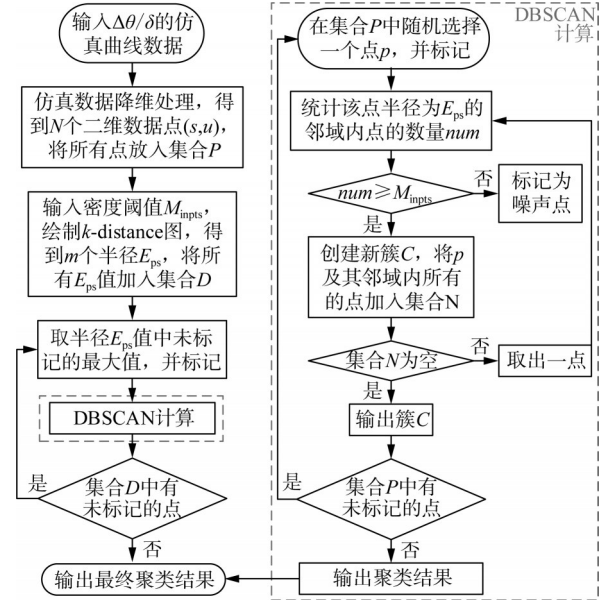


图7 多次DBSCAN算法计算流程图

Fig. 7 Multiple DBSCAN algorithm calculation flow chart

多次DBSCAN算法对仿真数据集的聚类具体步骤如下。

1) 对 $\Delta\theta/\delta$ 的所有仿真曲线进行降维处理,得到的 N 个数据点放入集合 P 。每条仿真曲线由大量的数据点组成,扰动接入时间后的曲线上包含 n 个点 (x_i, y_i) ,其中, $i=1, 2, \dots, n$; x_i 为仿真时间; y_i 为时间点 x_i 对应的 $\Delta\theta/\delta$ 仿真数据。以每条仿真曲线的波动程度和最大振幅对其进行降维处理,得到表征仿真曲线特点的二维数据点 (s, u) ,以仿真曲线的最大数据与最小数据的差值 s 表征仿真曲线的最大振幅;以仿真曲线上受到扰动后所有数据的标准差 u 表征仿真曲线的波动程度。 s 和 u 可由式(12)一(13)求得。

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (12)$$

$$u = \max \{ y_1, y_2, \dots, y_n \} - \min \{ y_1, y_2, \dots, y_n \} \quad (13)$$

式中 $\bar{y}$ 为扰动后仿真数据。

2) 输入参数 M_{inpts} 的值,绘制 k -distance曲线图,找出图中所有的有效距离突变点,确定 m 个 E_{ps} 的值。整个算法过程中参数 M_{inpts} 的值保持不变,本文仿真数据较多,取 $M_{inpts}=N/25$,值得注意的是,处于 k -distance图右上部分的距离突变点容易造成大量甚至所有数据点被识别为一个簇的情况,属于无效 E_{ps} 。若在某个区间内存在多个突变点,可取这些突变点距离的均值,且该区间应小于 M_{inpts} 的值。

3) 输入最大参数 E_{ps} 对数据集 P 执行第一次 DBSCAN 算法。最大参数 E_{ps} 的聚类计算会将数据集 P 中过于离散的点作为噪声点去除, 同时将一部分距离较近的点簇合并。经最大参数 E_{ps} 聚类后的簇中既有被单独识别的点簇, 也有未被识别而导致合并的点簇。

4) 输入其余的参数 E_{ps} 执行第 $i(i=2, 3, \dots, m-1)$ 次 DBSCAN 算法。较小参数 E_{ps} 的聚类计算会将上一步骤中未被识别而导致合并的簇进行再次识别, 进一步提取数据点的特征信息。

5) 将各次聚类结果进行合并, 得到最终的聚类结果。

3 仿真分析

本文在 MATLAB/Simulink 中搭建了两种新能源电源逆变器多机并网仿真模型, 如图 8 所示。图中, Z_g 为线路阻抗, GFL/GFM 逆变器并网控制结构如图 1 和图 3 所示。

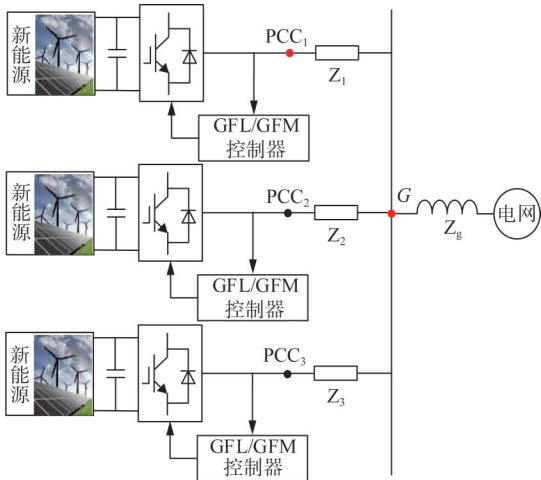


图 8 新能源电源多机并网仿真模型示意图

Fig. 8 New energy multi-machine grid connection simulation model diagram

本文新能源电源多逆变器并网仿真系统中的主要参数如表 1 所示。实际电网中新能源电源距离较远, 电网侧通常为弱电网(并网点短路比小于 3 p. u.), 所以在仿真系统中不失一般性的选择短路比为 2.3。仿真系统中扰动/故障产生的位置设有两处, 逆变器出口处和多逆变器与电网的连接处, 分别对应图 8 中标红的点 PCC_1 和点 G 。系统扰动场景包括系统负荷投/切、不同位置的单相短路故障、

两相短路故障、两相短路接地故障、三相短路故障, 其扰动参数设置由 rand 函数随机产生, 以上扰动/故障场景各仿真 100 次, 两处共计 1 000 组数据。对新能源电源逆变器多机并网系统仿真模型进行分组批量仿真得到表征系统运行状态物理量的时序轨迹曲线集, 主要考虑的物理量包含逆变器与 PCC 的相位差($\Delta\theta$)、系统频率(f)、逆变器功角(δ)、逆变器输出的有功功率(P)、无功功率(Q)和电压有效值(V_{rms})。然后, 对 $\Delta\theta/\delta$ 的仿真曲线集进行多次 DBSCAN 聚类计算, 根据 $\Delta\theta/\delta$ 的聚类结果对所有物理量的仿真数据进行分类处理。

表 1 新能源电源多机并网系统的主要参数

Tab. 1 Main parameters of new energy sources grid-connected system

参数	数值
电网电压 V	380 V/50 Hz
新能源并网逆变器额定功率/kW	50
无穷大电网等效电感/mH	20(对应的短路比为 2.3)
额定直流电压/V	1 000
并网逆变器 DC 侧电容/ μ F	4 700
线路阻抗 Z_g/Ω	0.002+j0.001

3.1 GFL 并网逆变器的同步稳定特征聚类分析

通过批量仿真共得到 1 000 组 GFL 逆变器并网系统的仿真曲线, 设定密度阈值 $M_{inpts}=40$, 取 $k=M_{inpts}$, 生成 $\Delta\theta$ 的仿真数据降维后的 k -distance 图, 如图 9 所示。

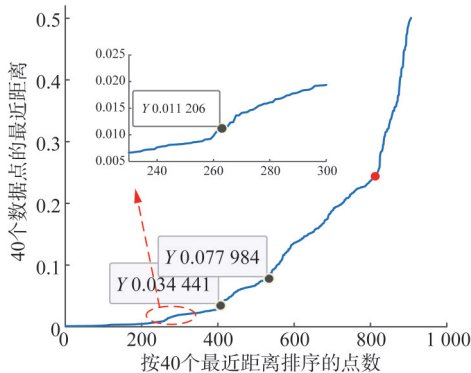


图 9 $\Delta\theta$ 仿真数据降维后的 k -distance 图

Fig. 9 k -distance diagram of the simulation data of $\Delta\theta$ after dimensionality reduction

由图 9 可得到 4 个距离突变点, 但图 9 中标红的点处于 k -distance 图右上部分, 属于 2.2 节中所说的无效突变点, 由此只得到 3 个有效的距离突变

点,其对应的距离分别为0.011 2、0.034 4和0.078 0。由算法的第2个步骤,取最大半径参数 $E_{ps}=0.078$,此步骤的聚类计算识别出分布密度较小的簇1和分布密度较大的簇2两个点簇。接着算法的第3个步骤将第2个步骤中得到的分布密度较小的簇1分割为3个点簇,最终整合后的聚类结果如图10所示。

从图10中可以看到多次DBSCAN算法将GFL逆变器并网系统的仿真数据聚类为4个簇和一组噪声点。根据此聚类结果,对GMF逆变器并网系统中所有物理量仿真数据的分类结果如图11所示。

图11中的(a)~(d)类依次对应图10中的簇1~

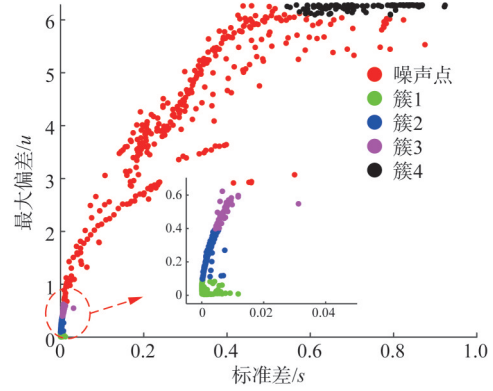


图10 $\Delta\theta$ 多次DBSCAN算法聚类结果

Fig. 10 Multiple DBSCAN algorithm clustering results of $\Delta\theta$

4,在a类中,在0.3 s系统发生扰动后, $\Delta\theta$ 仿真曲

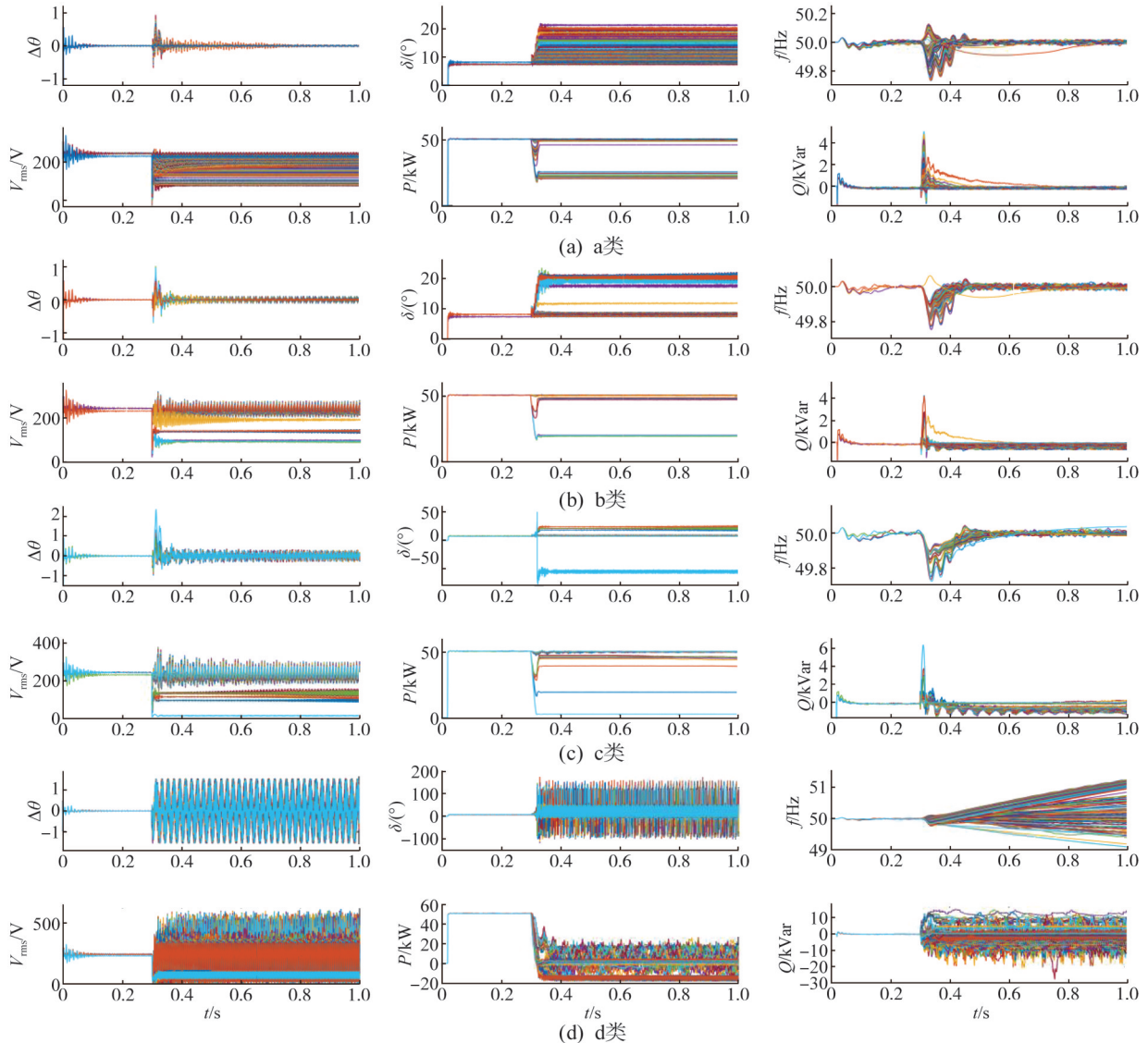


图11 GFL逆变器并网系统仿真数据的聚类 and 分类结果

Fig. 11 Clustering and classification results of simulation data of GFL inverter grid-connected system

线在 0.3~0.6 s 内逐渐恢复到扰动前的状态, PLL 能够成功锁相, 功角 δ 仿真曲线也能够过渡到新的或恢复到原来运行状态, 系统频率 f 仿真曲线在 0.3~0.5 s 内逐渐恢复稳定, 个别扰动下逆变器的输出电压和有功功率出现不同程度的跌落, 系统发生电压失稳, 但系统未失去同步。在 b、c 类中, $\Delta\theta$ 、 δ 和系统频率仿真曲线在 0.3 s 后出现不同幅度的振荡现象, 无法维持稳定, 逆变器输出电压和功率也出现振荡或严重跌落。d 类中的每组曲线在 0.3 s 后均发生严重振荡, PLL 锁相失败, 系统功角失稳, 系统频率已无法维持在额定频率左右, 系统失稳。由此可见, PCC 点运行状态是否稳定很大程度上影响着 GFL 逆变器并网系统的同步稳定。

3.2 GFM 并网逆变器的同步稳定特征聚类分析

应用与前述 GFL 并网系统类似的仿真和聚类分析方法, 不同的是这里对逆变器功角 δ 的仿真数据进行多次 DBSCAN 聚类分析。 δ 仿真数据降维后的 k -distance 图如图 12 所示。

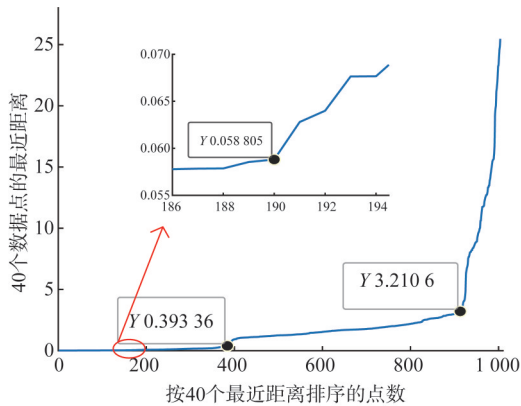


图 12 δ 仿真数据降维后的 k -distance 图

Fig. 12 k -distance diagram of the simulation data of δ after dimensionality reduction

由图 12 可得 3 个距离突变点, 其对应的距离分别为 0.058 8、0.393 4 和 3.210 6。最大半径参数 $E_{ps}=3.210 6$ 时的聚类计算识别出簇 1、簇 2 和簇 3, 然后算法的第 3 个步骤将第 2 个步骤得到的分布密度较小的簇 1 分割为了两个点簇, 经过多次 DBSCAN 算法聚类整合后的最终结果如图 13 所示。

从图 13 中可以看到多次 DBSCAN 算法将 GFM 逆变器并网系统的仿真数据也分为了 4 个簇和一组噪声点。结合该聚类结果, GFM 逆变器并网系统

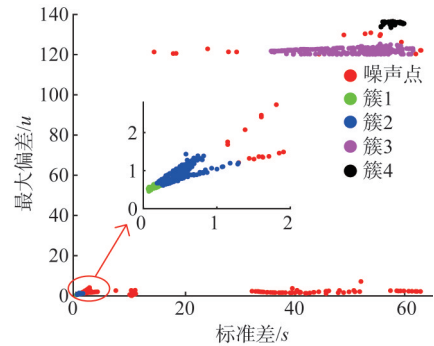


图 13 δ 多次 DBSCAN 算法聚类结果

Fig. 13 Multiple DBSCAN algorithm clustering results of δ

中所有物理量仿真数据的分类情况如图 14 所示。

图 14 中的(a)—(d)类依次对应图 13 中的簇 1—4。在 a 类中, 在 0.3 s 系统发生扰动后, $\Delta\theta$ 仿真曲线相较于扰动前没有变化, 而功角 δ 仿真曲线在扰动后 0.1 s 内过渡到新的或恢复到原来运行状态, 系统频率、逆变器输出电压和功率曲线均能够保持稳定或在合理范围内波动, 系统仍保持同步稳定。在 b 类中, $\Delta\theta$ 仿真曲线在扰动后的 0.1 s 内迅速恢复到扰动前的状态, δ 和系统频率的仿真曲线出现小幅度振荡, 逆变器输出电压、功率曲线出现严重振荡。可以看出虽然 VSG 同步控制环节仍稳定运行, 但系统已然失去同步稳定。在 c、d 类中, 每组曲线在扰动后均出现大幅度振荡, 甚至无规则波动, 系统崩溃失稳。由此看出 VSG 控制单元的稳定运行无法表征 GFM 逆变器并网系统的同步稳定。

3.3 对比分析

本文根据 $\Delta\theta$ 和 δ 两个参数作为聚类对象的聚类结果进行对比分析, 两者对应的聚类结果如图 15—16 所示。

由图 15 可见, GFL 逆变器并网系统以 $\Delta\theta$ 和 δ 为聚类对象的聚类结果相似, 每个点簇的数量相差在 $\pm 1.5\%$ 以内, 因此, GFL 并网逆变器可以 $\Delta\theta$ 和 δ 作为聚类对象进行同步稳定特征分析。结合图 11 可见, GFL 并网系统同步稳定的主要表现为控制环节 PLL 成功锁相和功角 δ 能够过渡到新的或恢复到原来运行状态。

由图 16 可见, 以 $\Delta\theta$ 为聚类对象的聚类结果中簇 1 的数据点数约等于以 δ 为聚类对象的聚类结果中簇 1 和簇 2 数据点数之和, 而 $\Delta\theta$ 的聚类结果中簇 2 和簇 3 的数据点数分别与 δ 聚类结果中簇 3 和簇 4 的点数相近。以 $\Delta\theta$ 为聚类对象只能将这 1 000 组仿

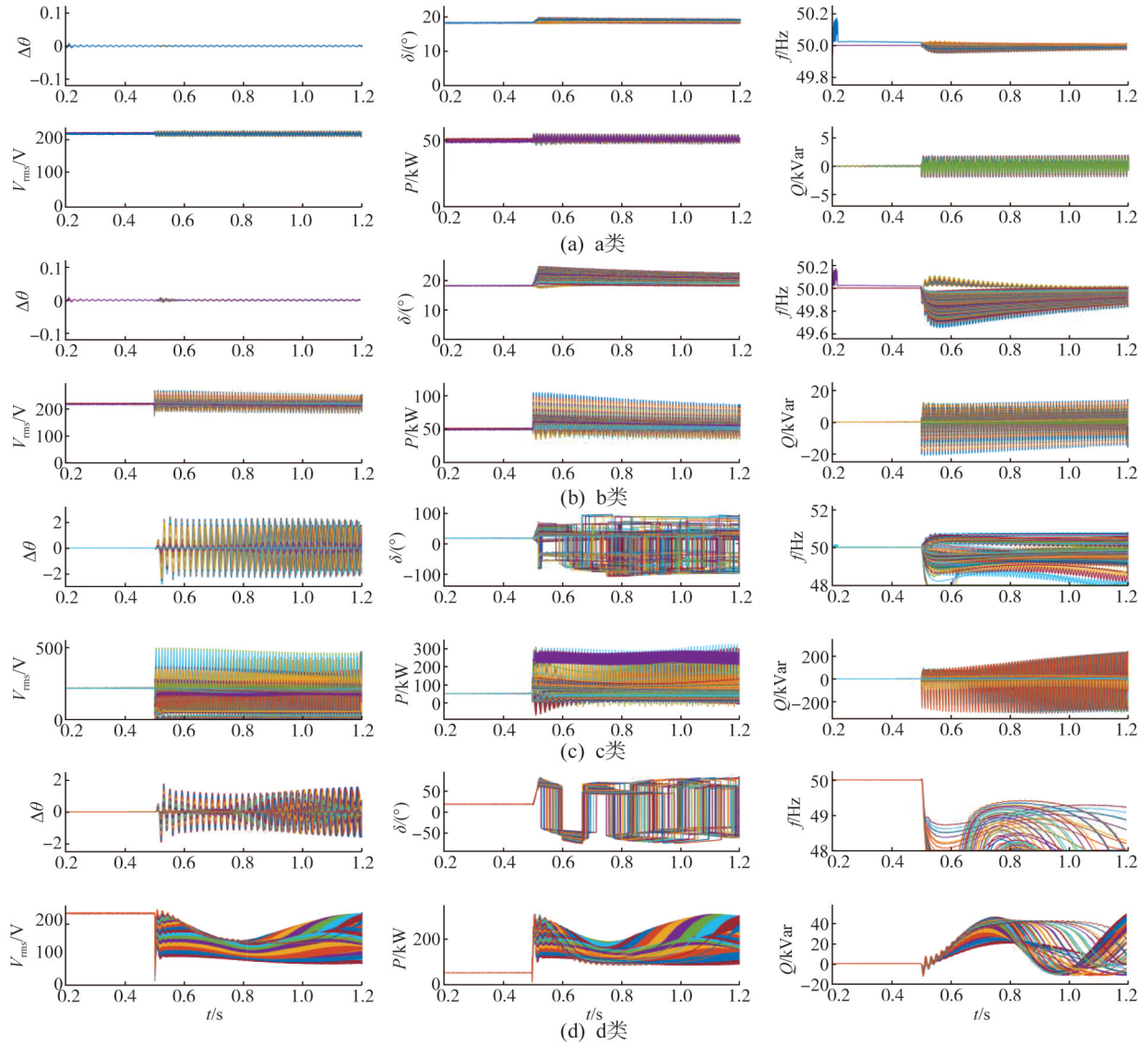


图 14 GFM 逆变器并网系统仿真数据的聚类 and 分类结果

Fig. 14 Clustering and classification results of simulation data of GFM inverter grid-connected system

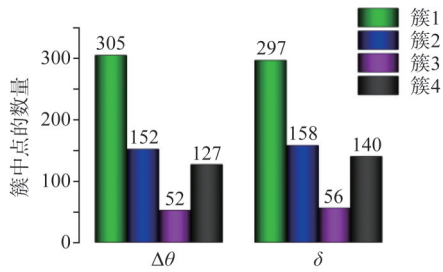


图 15 GFL 并网逆变器的聚类结果统计对比

Fig. 15 Statistical comparison of clustering results of GFL grid-connected inverters

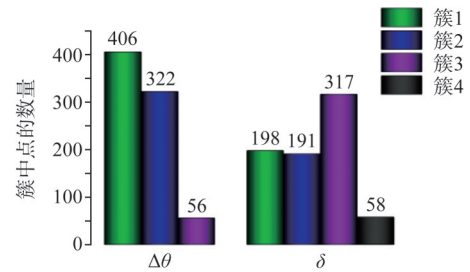


图 16 GFM 并网逆变器的聚类结果统计对比

Fig. 16 Statistical comparison of clustering results of GFM grid-connected inverters

真数据分为 3 类, 即图 14 中 a—b 类、c 类和 d 类, 而图 14 中的 a 类曲线是同步稳定的, b 类曲线是振荡的, 具有明显的特征差异。这一现象说明以 $\Delta\theta$

为聚类对象无法实现对 GFM 逆变器并网系统的同步稳定特征提取, 而以 δ 作为聚类对象进行同步稳定特征分析更为合理。再对比图 11 和图 14 中 $\Delta\theta$ 仿

真曲线的a—b类,在扰动场景设置相似的情况下,GFM同步控制单元稳定运行的扰动场景明显多于GFL同步控制单元。因此,相较于GFL同步控制单元,GFM同步控制单元有较好的抗干扰性。

4 结论

本文构建了GFL/GFM新能源电源多机并网系统,分别对上述两种并网系统进行了批量仿真,针对仿真数据密度分布不均匀的情况提出多次DBSCAN聚类算法,对 $\Delta\theta$ 、 δ 、频率等物理量进行了聚类 and 分类分析,得出以下几点结论。

1)GFL逆变器并网系统的同步稳定主要表现特征是同步控制单元成功锁相和逆变器功角为稳定值;对于GFM逆变器并网系统,虽然其同步控制单元有较强的抗扰性,但其他控制环节在扰动的冲击下会发生失稳,无法表征系统的同步稳定。因此,GFM并网逆变器的同步稳定主要表现特征为系统功角为稳定值。

2)GFL和GFM逆变器并网系统的同步稳定特征均与系统频率联系紧密,频率稳定也可作为逆变器并网系统同步稳定的物理表征。

3)系统同步稳定与频率稳定具有一致性,但有功功率平衡已无法全面表征新能源电源的频率稳定,特别是GFM逆变器的内电势相角动态无法完全反映其同步稳定的动态特性,因此需要进一步提取表征同步稳定特征的其他物理/数字量。

参考文献

- [1] 谢小荣,贺静波,毛航银,等.“双高”电力系统稳定性的新问题及分类探讨[J].中国电机工程学报,2021,41(2):461-475.
XIE Xiaorong, HE Jingbo, MAO Hangyin, et al. New issues and classification of power system stability with high shares of renewables and power electronics [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(2): 461-475.
- [2] TAUL M D, WANG X, DAVARI P, et al. An overview of assessment methods for synchronization stability of grid-connected converters under severe symmetrical grid faults [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(10): 9655-9670.
- [3] HATZIARGYRIOU N, MILANOVIC J, RAHMANN C, et al. Definition and classification of power system stability - revisited & extended [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2021, 36(4): 3271-3281.
- [4] 杨鹏,刘锋,姜齐荣,等.“双高”电力系统大扰动稳定性:问题、挑战与展望[J].清华大学学报(自然科学版),2021,61(5):403-414.
- [5] 耿华,何长军,刘浴霜,等.新能源电力系统的暂态同步稳定研究综述[J].高电压技术,2022,48(9):3367-3383.
GENG Hua, HE Changjun, LIU Yushuang, et al. Overview on transient synchronization stability of renewable-rich power systems [J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(9): 3367-3383.
- [6] WU Heng, WANG Xiongfei. Design-oriented transient stability analysis of PLL-synchronized voltage source converters [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(4): 3573-3589.
- [7] GU Y, GREEN T C. Power system stability with a high penetration of inverter-based resources [J]. Proceedings of the IEEE, 2023, 111(7): 832-853.
- [8] 胡家兵,袁小明,程时杰.电力电子并网装备多尺度切换控制与电力电子化电力系统多尺度暂态问题[J].中国电机工程学报,2019,39(18):5457-5467,5594.
HU Jiabin, YUAN Xiaoming, CHENG Shijie. Multi-time scale transients in power-electronized power systems considering multi-time scale switching control schemes of power electronics apparatus [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(18): 5457-5467, 5594.
- [9] LI Zhiyi, SHAHIDEHPOUR M. Small-signal modeling and stability analysis of hybrid AC/DC microgrids [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(2): 2080-2095.
- [10] 黄林彬,辛焕海,鞠平,等.电力电子并网装备的同步稳定分析与统一同步控制结构[J].电力自动化设备,2020,40(9):10-25.
HUANG Linbin, XIN Huanghai, JU Ping, et al. Synchronization stability analysis and unified synchronization control structure of grid-connected power electronic devices [J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(9): 10-25.
- [11] 姜齐荣,赵崇滨.并网逆变器的电磁暂态同步稳定问题[J].清华大学学报(自然科学版),2021,61(5):415-428.
JIANG Qirong, ZHAO Chongbin. Electromagnetic transient synchronization stability with grid-connected inverters [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2021, 61(5): 415-428.
- [12] 刘威,谢小荣,王衡,等.基于频率耦合阻抗模型的并网变流器全工况小信号稳定性分析[J].中国电机工程学报,2020,40(22):7212-7221.
LIU Wei, XIE Xiaorong, WANG Heng, et al. Frequency-coupled impedance model-based small-signal stability analysis of grid-tied converters under all operating conditions [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(22): 7212-7221.
- [13] WU Heng, WANG Xiongfei. Design-oriented transient stability analysis of PLL-synchronized voltage source converters [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(4): 3573-3589.
- [14] PEI Jinxin, YAO Jun, LIU Yuan, et al. Modeling and transient synchronization stability analysis for PLL based renewable energy generator considering sequential switching schemes [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2022, 37(2): 2165-2179.
- [15] 袁辉,辛焕海,王康,等.弱电网下远端严重电压跌落时逆变

- 器并网失稳机理分析[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(22): 38-43, 117.
- YUAN Hui, XIN Huanhai, WANG Kang, et al. Instability mechanism analysis of inverters connected to weak grid during severe voltage sag on remote grid side [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(22): 38-43, 117.
- [16] LI S, YAN Y, YUAN X. SISO equivalent of MIMO VSC-dominated power systems for voltage amplitude and phase dynamic analyses in current control time-scale [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2019, 34(3): 1454-1465.
- [17] 黄林彬, 章雷其, 辛焕海, 等. 下垂控制逆变器的虚拟功角稳定机理分析[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(12): 117-123, 150.
- HUANG Linbin, ZHANG Leiqi, XIN Huanhai, et al. Mechanism analysis of virtual power angle stability in droop-controlled inverter [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(12): 117-123, 150.
- [18] LI Mingxuan, SHU Sirui, WANG Yue, et al. Analysis and improvement of large-disturbance stability for grid-connected VSG based on output impedance optimization [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2022, 37(8): 9807-9826.
- [19] 曾四鸣. 大数据挖掘技术在电力行业中的应用[J]. 电力大数据, 2017, 20(9): 81-84.
- ZENG Siming. The application of big data mining (DM) technology in power system [J]. Power Systems and Big Data, 2017, 20(9): 81-84.
- [20] 周孝信, 陈树勇, 鲁宗相, 等. 能源转型中我国新一代电力系统的技术特征[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(7): 1893-1904, 2205.
- ZHOU Xiaoxin, CHEN Shuyong, LU Zongxiang, et al. Technology features of the new generation power system in China [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(7): 1893-1904, 2205.
- [21] 闫湖, 黄碧斌, 刘龙珠. 人工智能在新一代电力系统中的应用前景分析[J]. 电力信息与通信技术, 2018, 16(11): 7-11.
- YAN Hu, HUANG Bibin, LIU Longzhu. Artificial intelligence application prospect in the new generation of electric power system [J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2018, 16(11): 7-11.
- [22] 吴双, 胡伟, 张林, 等. 基于AI技术的电网关键稳定特征智能选择方法[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(1): 14-21, 316.
- WU Shuang, HU Wei, ZHANG Lin, et al. An intelligent key feature selection method of power grid based on artificial intelligence technology [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(1): 14-21, 316.
- [23] 丁长新, 张沛, 孟祥飞, 等. 基于分类回归树算法的在线静态电压稳定裕度评估[J]. 电力系统及其自动化学报, 2020, 32(1): 93-100.
- DING Changxin, ZHANG Pei, MENG Xiangfei, et al. Online evaluation on static voltage stability margin based on classification and regression tree algorithm [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2020, 32(1): 93-100.
- [24] ZHU H, SHI Y, WANG H, et al. New feature extraction method for photovoltaic array output time series and its application in fault diagnosis [J]. IEEE Journal of Photovoltaics, 2020, 10(4): 1133-1141.
- [25] 郭剑, 朱炳铨, 徐泰山, 等. 基于历史数据聚类分析的暂态功角稳定故障筛选[J]. 电力工程技术, 2020, 39(2): 75-80.
- GUO Jian, ZHU Bingquan, XU Taishan, et al. Transient power angle stability contingency screening based on clustering analysis of historical data [J]. Electric Power Engineering Technology, 2020, 39(2): 75-80.
- [26] 张建新, 刘宇明, 邱建, 等. 区域新能源并网暂态功角稳定分析与紧急控制策略优化[J]. 南方电网技术, 2024, 18(7): 129-138.
- ZHANG Jianxin, LIU Yuming, QIU Jian, et al. Transient power angle stability analysis of regional new energy integration and coordinated control strategy [J]. Southern Power System Technology, 2024, 18(7): 129-138.
- [27] 张建新, 蔡镗涵, 李诗旸, 等. 利用网络等值进行图降维的图注意力暂态功角稳定评估模型[J]. 南方电网技术, 2024, 18(4): 30-40.
- ZHANG Jianxin, CAI Zihan, LI Shiyang, et al. Transient power angle stability evaluation model for graph attention using network equivalence for graph dimensionality reduction [J]. Southern Power System Technology, 2024, 18(4): 30-40.

收稿日期: 2024-01-03; 网络首发日期: 2025-06-15

作者简介:

范宏(1978), 女, 副教授, 博士, 从事新型电力系统稳定性研究工作;

彭瑞(1998), 男, 通信作者, 硕士, 研究方向为新能源电源同步稳定特性, pengrui1386@163.com;

张树卿(1983), 男, 副研究员, 博士, 研究方向为大电网暂态稳定分析与控制、高比例新能源电力系统稳定分析。

征稿启事

《南方电网技术》是由中国南方电网公司主管、南方电网科学研究院有限责任公司主办的电力技术类科技期刊,向国内外公开发行人。刊登电力系统的科研、规划、设计、工程、生产运行、设备和系统维护等方面的成果、经验和动态,尤其是科研创新方面的论文。设有特约专稿、高压直流输电、高电压与绝缘、系统分析与运行、控制与保护、调度与通信、输变电技术、电力技术经济、智能电网、分布式电源与微电网、低碳电力等栏目。热烈欢迎国内外的电力研究人员、工程技术人员、大专院校师生踊跃投稿。

1 文稿要求

1)文稿应未在其他刊物上发表过,译文稿件须附上原作者的书面许可证明。内容要有科学性、创新性和实用性;论点明确、数据可靠、说理严谨、数学推导简明;语言流畅、文字简练、层次分明、重点突出。

2)学术论文请按GB 7713—1987《科学技术报告、学位论文和学术论文的编写格式》书写,篇幅以版面不超过9 000字(包括图表所占篇幅)为宜。同时请写明如下a,b,c,d,e五项:

a)作者署名(不宜超过7位)、作者单位、地址、电话、email信箱和邮政编码;

b)论文题目和作者单位英译文,作者姓名的汉语拼音;

c)作者的简历,包括姓名、出生年、性别、籍贯、职称、学位、当前从事的研究或工作等项;

d)350字左右的中文摘要,3~8个关键词,以及摘要和关键词相应的英文文本。摘要采用第三人称写法,内容包括论文的目的、方法、结果和结论;

e)若为国家基金资助项目或部、省级重大科研攻关项目,需提供项目名称及编号。

2 书写格式

1)要求文稿正文字号为5号,汉字字体为宋体,英数字体为Times New Roman,希腊字体为Symbol。文稿须采用可编辑的电子文档形式。

2)计量单位采用国家法定计量单位和符号,不能用“大气压”、“kgf/cm²”、“卡”、“ppm”等已废除的计量单位。

3)文中和公式中容易混淆的字符请注明文种(希文、英文、罗马字等)、大小写、上下标及上下标字母含义,表示矢量及矩阵的字符用黑斜体表示或特别注明。

4)文稿标题中不宜用缩略词(化学符号和公知公用者除外);摘要和正文中的缩略词在第一次出现时必须写出全称,后加括号附缩略词。

3 表格、插图及参考文献

1)表格尽量采用“三线表”。表格的上方写表序和表名。表名应有自明性且中文、英文表名并列。表注放在表底,缩入1个汉字以“注:”起头排版。

2)插图的下方面应有图序和图名。图名应有自明性且中英文图名并列。工程图、电气图和函数图采用AutoCAD、

Adobe Illustrator或Corel DRAW软件绘制,工程图和电气图要符合国家标准规定,函数图要标明曲线序号及其注释,坐标轴上要有标值、标目,注明物理量和单位;数码照片图具备200万总像素以上。

3)图片和表格中的文字、变量、单位和数字要齐全、清晰。

4)参考文献应选用公开发表的资料,按引用的先后次序列表于文后,以[1]、[2]…标识序号,且与正文中的指示序号一致。按《信息与文献 参考文献著录规则,GB/T 7714—2015》和《中国学术期刊(光盘版)检索与评价数据规范,CAJ-CD B/T 1—2006 修订版试行稿》的要求著录文后参考文献。中文参考文献后要并列其英文译文(如示例[6]所示)。

文献类型及其标识为:普通图书[M];会议论文[C];报纸文章[N];期刊文章[J];学位论文[D];报告[R];标准[S];专利[P];汇编[G];档案[B];古籍[O];参考工具[K];其他未说明的文献类型,例如可公开的政府行政部门编号文件、行业或大公司的技术规范或工作手册[Z]。网上期刊[J/OL];网上电子公告[EB/OL]。电子文献尚需在载体标记后加上发表或更新日期(加圆括号)、引用日期(加方括号)和电子文献网址。

4 投稿

1)请登录《南方电网技术》编辑部网站<https://nfdwjs.csg.cn>,选择“作者登录”,登录或注册登录后选择投稿并按提示操作,登录方面出现问题请致电020-36625646咨询。

2)投稿时务必附上联系电话(手机为佳)。

3)编辑部不保证留存稿件,请作者自留底稿。稿件评审进程和结论可在《南方电网技术》编辑部网站上即时查询。作者也可致电020-36625642、36625643或发送电子邮件到nfdwjs@csg.cn向编辑部了解审稿情况。

4)文章一经发表,编辑部便取得作者的自动授权,可将文章收录入本刊网站,及与本刊有合作关系的数据库。

参考文献著录格式示例:

- [1] 刘国钧,陈绍业,王凤翥. 图书馆目录[M]. 北京:高等教育出版社,1957:15-18.
- [2] 钟文发. 非线性规划在可燃毒物配置中的应用[C]//赵玮. 运筹学的理论与应用——中国运筹学会第五届大会论文集. 西安:西安电子科技大学出版社,1996:468-471.
- [3] 冯西桥. 核反应堆压力管道与压力容器的LBB分析[R]. 北京:清华大学核能技术设计研究院,1997.
- [4] 中国国家标准化管理委员会. 信息与文献 参考文献著录规则:GB/T 7714—2015[S]. 北京:中国标准出版社,2015.
- [5] 邓一刚. 全智能节电器:200610171314.3[P]. 2006-12-13.
- [6] 陈祥. 无线技术在现代电网管理中的应用与展望[J]. 南方电网技术,2009,3(6):85-89.
CHEN Xiang. Development of wireless technology in modern power grid management and its perspective [J]. Southern Power System Technology, 2009,3(6):85-89.
- [7] 王明亮. 关于中国学术期刊标准化数据库系统工程的进展[EB/OL]. (1998-08-16) [1998-10-04]. <http://www.cajcd.edu.cn/pub/wml.txt/980810-2.html>.

《南方电网技术》编辑部