

文章编号:1671-5896(2026)04-0841-10

基于参数权重的虚拟同步机同调等值算法

曹同利¹, 刘鸿鹏², 刘曙光¹, 刘爱忠¹, 胡勇¹, 刘雷¹

(1. 山东鲁软数字科技有限公司 智慧能源分公司, 济南 250098; 2. 东北电力大学 电气工程学院, 吉林 吉林 132012)

摘要: 针对传统同调分析方法在处理多逆变器参数耦合问题时存在显著不足, 难以满足大规模电力系统降阶建模对精度与效率的双重要求的局限性, 提出一种基于参数权重的虚拟同步机 (VSG: Virtual Synchronous Generator) 同调等值算法。首先, 在强电网假设下, 通过解耦分析逆变器输出功率动态特性, 建立虚拟转子运动方程与参数间的数学模型, 明确转动惯量 (J)、阻尼系数 (D) 及线路电抗 (X) 对虚拟转子角的差异化作用机理。其次, 引入偏导数积分法量化各参数在暂态过程中对转子角轨迹的影响权重, 突破传统 K -means 聚类算法仅依赖欧氏距离的局限, 提出基于参数权重的加权聚类策略, 显著提升同调群划分的物理意义与准确性。同时, 结合有功功率守恒原则, 推导无功功率聚合算法, 构建兼顾有功-无功动态特性的等值模型。为验证算法有效性, 在 PLECS 仿真平台搭建含 10 台异构 VSG 的并联系统, 设置电阻接地、切机故障等多扰动场景进行测试。结果表明, 在不同扰动工况下, 所提算法可精准识别同调逆变器群组, 其划分结果与转子角轨迹的时域仿真高度吻合。等值模型的有功功率最大误差小于 1.5%, 无功功率误差低于 2.8%, 验证了算法的工程适用性。其为高比例新能源电力系统的动态稳定分析与高效仿真提供了理论依据和技术支撑。

关键词: 同调等值算法; 参数权重; 加权聚类; 虚拟同步机; 动态聚合

中图分类号: TP273; TM743

文献标志码: A

Homology Equivalence Algorithm of Virtual Synchronous Machine Based on Parameter Weight

CAO Tongli¹, LIU Hongpeng², LIU Shuguang¹, LIU Aizhong¹, HU Yong¹, LIU Lei¹

(1. Smart Energy Branch, Shandong Luruan Digital Technology Company Limited, Jinan 250098, China;

2. School of Electrical Engineering, Northeast Electric Power University, Jilin 132012, China)

Abstract: The extensive integration of distributed generation complicates power system operation, challenging the computational efficiency and scalability of existing analytical tools. To address this, efficient reduced-order modeling techniques must be developed for representing multi-inverter networks. A promising approach involves coherency-based aggregation to create simplified dynamic models for large-scale distributed generation systems with heterogeneous inverters. Simple and efficient, conventional methods retain network nonlinearities, limiting accuracy in dynamic analyses under disturbances. And prior coherency analyses often overlook virtual EMFs (Electromotive Forces) and parameter coupling effects among inverters. To resolve these limitations, a parameter weight-based coherency equivalence method for VSGs (Virtual Synchronous Generators) is proposed. First, through small-signal analysis, the voltage-current dual-loop control of inverters is shown to exert minimal influence on virtual rotor motion, enabling the derivation of a virtual synchronous generator excitation model

收稿日期: 2025-07-18.

基金项目: 鲁软科技公司智慧能源分公司 2025 年度虚拟同步发电机 (VSG) 控制技术使用基金资助项目 (SGSDLRZNMYS2600277)

作者简介: 曹同利 (1984—), 男, 济南人, 山东鲁软数字科技有限公司高级经济师, 主要从事新能源构网型 V2G 充电桩等研究, (Tel) 86-531-80816032 (E-mail) 2290225591@qq.com; 通讯作者: 刘爱忠 (1982—), 男, 山东曹县人, 山东鲁软数字科技有限公司高级工程师, 主要从事大功率储能变流器, 高频软开关双向 DCDC 变换器, 电源建模及控制研究, (Tel) 86-531-80816032 (E-mail) laz_4919@163.com.

grounded in physical principles. This achieves precise coherency identification under small perturbations while clarifying the parametric influence mechanisms. Subsequently, virtual rotor motion equations are utilized to quantitatively analyze parameter impacts (e.g., moment of inertia J , damping coefficient D , and line reactance X), with results assigned as parameter weights to establish a weighted coherency algorithm. This algorithm enables rapid and accurate identification of coherent inverter clusters, followed by an aggregation algorithm that integrates active power conservation and reactive power dynamic equivalence. The correctness and effectiveness of the proposed coherency and aggregation methods are validated via PLECS simulations.

Key words: coherency equivalence algorithm; parameter weight; weighted clustering; virtual synchronous generator(VSG); dynamic aggregation

0 引言

随着电网规模的不断扩大,其使详细的暂态分析变得越来越困难,因此需要简化模型以减轻计算负担。同时,可再生能源如光伏和风力发电的快速发展,促使电力系统向基于逆变器的分布式发电转变,而同调等值分析对适应这种新型电力系统的需求显得尤为重要。通过合适的模型简化技术^[1-4],可将复杂的分布式发电网络简化为可计算的规模,为电力系统的运行和规划提供技术支撑^[5-6]。

针对发电设备的同调识别研究可分为两类:基于测量数据和模型的同调识别算法。基于测量数据的同调识别算法主要利用实际测量数据进行分析。Ma等^[7]通过使用在线参数灵敏度加权的方法识别同调的发电群。Tang等^[8]引入哈尔蒙均值聚类方法进行在线分析。然而,基于测量数据的同调识别算法对数据的质量和准确性要求较高。如果测量数据受到干扰、噪声或其他不确定性的影响,可能会导致同调性识别结果的不准确性。并且同调识别算法通常需要处理大量的数据样本,特别是在高维度的情况下。而处理大规模数据集可能需要更多的计算资源和时间,其对计算能力和存储空间提出了更高的要求。

随着电力网络的日益复杂化,同调识别算法的计算效率变得越来越重要,而基于模型的同调识别算法通常具有较高的计算效率和运行速度。若其模型建立完毕,就可通过模型进行快速的预测和计算,从而节省时间和资源。并且基于模型的算法还能提供对发电机行为和性能的更深入理解。通过建立准确的物理或数学模型,可从模型中推导出发电机的各种特性和行为,并进行同调性分析。这种基于模型的方法能为同调性研究提供更全面和深入的视角,有助于揭示发电机系统的内在机制和相互关系。

Liu等^[9]运用奇异摄动理论,提出了一种适用于下垂控制逆变器的同调识别算法。该算法基于慢同调性算法,为并网逆变器的同调性识别提供了有效的方法。Liu等^[10]通过对风力发电设备中的有功控制环节进行推导,提出了类似于同步机的模型。该模型为风力发电设备的慢同调性集合模型提供了一种便捷的建模方法,以实现同调性的识别和分析。Philip等^[11]将广义特征值扰动方法应用于下垂控制逆变器网络的同调性识别和聚合,为系统的稳定性分析和控制提供了有效方法。

同调等值算法是电力系统建立降阶模型的重要工具,并且具有丰富的理论基础。目前,针对基于逆变器的等值模型,主要存在两种方法,即基于实测数据的非拓扑法和基于模型的拓扑法。非拓扑法通过利用实测数据估计外部系统的等值网络^[11]。由于实测数据容易受到干扰,并且目前只适用于外部系统处于静止状态的情况,因此其对负荷变化或线路故障等情况并不适用。在拓扑算法中,较为常见的方法是Ward算法。该算法仅利用外部系统的网络拓扑结构,可以通过状态估计提供内部与边界节点的电压幅值、相角以及联络线上的潮流信息,因此非常适合离线和在线应用场景^[12]。保持较为恒定的电动势可以有效避免同调群的误判。但在同调算法中,重点是研究在受到扰动情况下变流器虚拟转子角的运动趋势,该趋势受多种参数的影响。Xiong等^[13]研究了虚拟阻抗对动态稳定性的影响,并提出了一种增强动态稳定性的方法。该方法有助于改善虚拟同步发电机在电网电压骤降情况下的瞬态稳定性。Huang等^[14]提出了一种适用于虚拟同步发电机的动态虚拟阻抗,该方法通过参考同步发电机的阻尼效应提供阻尼效果,并消除了模拟摇摆方程中的阻尼项。这种方法能有效地提高虚拟同步发电机系统的稳定性,并进一步改善系统的动态响应。Li等^[15]重点研究了动态过程中可能存在的过电流风险,并通过比较分析了虚拟同步发电机系统中不同虚拟阻抗控制结构的动态性能。同时推导出了用于抑制瞬态电流的阻抗边界,并揭示了逆变器输出阻抗对系统动

态过程的影响。Chen 等^[16]研究了并联虚拟同步发电系统中不同虚拟惯性和阻尼系数对动态频率的影响。通过对系统进行分析和实验,提出了一种协调控制方法,以改善并联虚拟同步发电系统的动态频率性能。Xu 等^[17]通过分析阻尼系数对系统动态过程的影响,提出了一种改进的虚拟惯性算法。该算法针对虚拟同步发电系统的动态功率特性进行了优化,通过调整虚拟惯性参数,改善了系统在动态过程中的响应能力和功率特性。Jiang 等^[18]详细解释了转子惯性、阻尼系数和积分系数之间的相互作用关系,并提供了相应的参数设计原则。该研究着重考虑了虚拟同步发电系统的次级频率控制策略,在此基础上,对转子惯性、阻尼系数和积分系数进行了综合分析和优化设计。

综上所述,对逆变器的同调判断是基于其虚拟转子角在扰动下的变化趋势,而其趋势与逆变器和系统参数密切相关。在同调分析中,通常假设同调群的判别与扰动大小无关,从而可以使用小信号模型进行系统分析。目前常用的基于参数的同调判别方法(如 K-means 聚类算法)未考虑系统参数对虚拟转子角的影响,即不同参数对虚拟角速度的影响程度不同,直接基于参数划分同调群容易导致发电设备的误分类。因此,笔者提出了一种基于参数的同调算法,在进行同调判别时综合考虑了上述因素,提高了同调判别的准确性。

1 同调等值算法理论推导

1.1 输出功率解耦与转子运动方程

在电力系统进行同调分析时,通常假设同调分群与扰动无关,其使在小扰动情况下可利用系统的小信号模型对非线性量进行线性化处理,即小扰动下的分群结果在大扰动时同样适用,只是阈值选择不同。

在强电网环境下,公共耦合点(PCC: Point of Common Coupling)的电压幅值与相位可视为被无穷大电源钳位。笔者所采用的逆变器并联模型拓扑结构如图1所示,其中, R_{line} 和 X_{line} 分别表示逆变器与电网相连的电阻和电抗。逆变器的输出功率为

$$P_{ek} = v_k \sum_{m=1}^n (G_{mk} v_m \cos \delta_{mk} + B_{mk} v_m \sin \delta_{mk}), \quad (1)$$

其中 P_{ek} 表示第 k 台逆变器的输出功率, v_k 表示第 k 台逆变器的输出电压, v_m 表示电网的电压, G_{mk} 和 B_{mk} 分别表示与逆变器节点直接相连的电导和电纳, δ_{mk} 表示逆变器电压与电网电压之间的相位差。在假设线路为感性且忽略线路电阻的情况下,式(1)可简化为

$$P_{ek} = v_k \sum_{m=1}^n B_{mk} v_m \sin \delta_{mk}。 \quad (2)$$

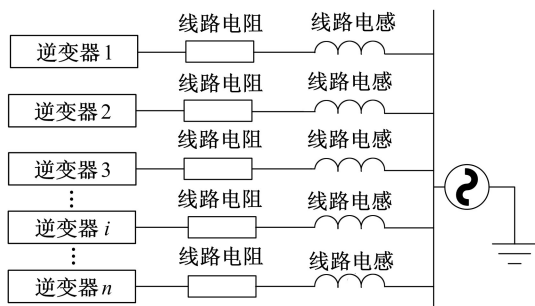


图1 逆变器并联模型

Fig.1 Inverter parallel model

由于逆变器节点直接与无穷大电网相连,并且受端电压的幅值和相位被视为无穷大电网钳位,同时在小扰动条件下逆变器的输出电压保持不变,因此可得出小信号表达式为

$$\Delta P_{ek} = v_k v_m B_{mk} \Delta \delta_k。 \quad (3)$$

由此可见,逆变器的输出有功功率与其他逆变器无耦合,仅与自身参数和线路参数相关。逆变器的转子角受到有功环节的转子运动方程控制方程如下:

$$P_{mk} - P_{ek} - D(\omega_k - \omega_{\text{grid}}) = J \frac{d\omega_k}{dt}, \quad (4)$$

其中 P_{mk} 表示第 k 台同步发电机的机械功率,在逆变器中可以将其视为参考功率, D 表示阻尼系数, w_k 表示第 k 台同步发电机的机侧角速度, J 在逆变器中被视为虚拟转动惯量。在扰动条件下, P_{mk} 表示常数,则式(4)的小信号模型为

$$-\Delta P_{ek} - D\Delta\omega_k = J \frac{d\Delta\omega_k}{dt}。 \quad (5)$$

将式(3)代入式(5)得到:

$$-\frac{v_k v_m}{JX_{mk}}\Delta\delta - \frac{D}{J} \frac{d\Delta\delta}{dt} = \frac{d^2\Delta\delta}{dt^2}. \quad (6)$$

1.2 参数权重确定与加权聚类

观察式(6)发现, 其为二阶常系数齐次微分方程, 则得到的通解为

$$\Delta\delta(t) = C_1 e^{-D/(2J)t} \sin \left[\sqrt{\frac{4 \frac{v_k v_m}{JX_{mk}} - \left(\frac{D}{J}\right)^2}{2}} t \right], \quad (7)$$

其中 v_k, v_m 表示定值, C_1 表示常数。因此, 每个逆变器的转子运动趋势仅与转动惯量 J 、阻尼系数 D 以及与逆变器直接相连的阻抗 X 相关。通过分析 J 、 D 和 X 的分布, 可以大致预测逆变器的分群结果。然而, 不同参数对转子运动的影响程度不同, 直接基于参数进行分群是不可行的。因此, 需要量化每个参数在暂态时间内对转子运动的影响。将其归一化为权重, 在进行分群时, 根据加权参数进行分组。不对 v_k 进行分析, 是因为与其他参数不同, v_k 并非一个可以独立设计的状态变量, 其值与其他系统参数(例如 X)相关。如果要分析 v_k 对转子角的影响, 必须将其影响与其他参数的影响解耦, 这会给下面的同调分析带来不必要的复杂性, 笔者期望可以通过加入励磁环节进行解决。

在计算权重时, 可以选择其中一台逆变器作为参考机, 假设参考机应为逆变器群中参数最接近平均值的逆变器, 这时可以确定参数 J 、 D 和 X 。然后对这3个参数分别进行偏导数运算, 以获得其在每个时刻对转子运动趋势的影响量。通过对这些偏导数进行积分, 可以确定在扰动时间内每个参数对转子运动的总影响量。每个参数的偏导数如下:

$$\begin{cases} \frac{\partial \Delta\delta}{\partial J} = \frac{De^{-D/(2J)t} \sin \frac{\omega_J}{2} t}{2J^2} + \frac{e^{-D/(2J)t} \left(-\frac{4EV}{XJ^2} + \frac{2D^2}{J^3} \right) t \cos \frac{\omega_J}{2} t}{4\omega_J}, \\ \frac{\partial \Delta\delta}{\partial D} = -\frac{e^{-D/(2J)t} \sin \frac{\omega_J}{2} t}{2J} - \frac{e^{-D/(2J)t} D t \cos \frac{\omega_J}{2} t}{2J^2 \omega_J}, \\ \frac{\partial \Delta\delta}{\partial X} = -\frac{e^{-D/(2J)t} EV t \cos \frac{\omega_J}{2} t}{X^2 J \omega_J}, \\ \omega_J = \sqrt{4 \frac{EV}{JX} - \frac{D^2}{J^2}}, \end{cases} \quad (8)$$

其中 E 表示网侧电压, V 表示逆变器输出电压, X 表示逆变器至网端阻抗之和, 积分后每个参数的权重为

$$\begin{cases} K_J = \frac{\int_0^T \frac{\partial \Delta\delta}{\partial J} d(t)}{\sqrt{\left(\int_0^T \frac{\partial \Delta\delta}{\partial J} d(t) \right)^2 + \left(\int_0^T \frac{\partial \Delta\delta}{\partial D} d(t) \right)^2 + \left(\int_0^T \frac{\partial \Delta\delta}{\partial X} d(t) \right)^2}}, \\ K_D = \frac{\int_0^T \frac{\partial \Delta\delta}{\partial D} d(t)}{\sqrt{\left(\int_0^T \frac{\partial \Delta\delta}{\partial J} d(t) \right)^2 + \left(\int_0^T \frac{\partial \Delta\delta}{\partial D} d(t) \right)^2 + \left(\int_0^T \frac{\partial \Delta\delta}{\partial X} d(t) \right)^2}}, \\ K_X = \frac{\int_0^T \frac{\partial \Delta\delta}{\partial X} d(t)}{\sqrt{\left(\int_0^T \frac{\partial \Delta\delta}{\partial J} d(t) \right)^2 + \left(\int_0^T \frac{\partial \Delta\delta}{\partial D} d(t) \right)^2 + \left(\int_0^T \frac{\partial \Delta\delta}{\partial X} d(t) \right)^2}}, \end{cases} \quad (9)$$

其中 K_J 、 K_D 和 K_X 分别表示转动惯量 J 的权重、阻尼系数 D 的权重和线路阻抗 X 的权重。若得到每个参数的权重值, 则将其分别乘以各自的权重, 然后按照 $[JK_J, DK_D, XK_X]$ 的方式进行组合, 从而得到一系列数组。然后, 可定义所需的聚类群数, 并利用 K -means 算法对这些数组进行聚类操作, 从而得到相应的聚类群。

1.3 聚合算法设计

目前适用于变流器的聚合算法已有许多文献报道, 但基于物理原理励磁环节的聚合算法仍需要进一步分析。按照有功环节的聚类原则, 即聚合前后的总输出有功功率保持不变, 可以推导出无功环节的聚合原则: 聚合前后的总无功功率保持不变, 并且等值机需要具有相似的励磁结构。基于上述原则, 变流器励磁环节的聚合方式如下:

$$\Delta Q_{eq} = \sum_1^n \Delta Q_k = \left(\sum_1^n \frac{1 + pT'_{dok}}{K_i} \right) \Delta E'_q = \frac{1 + pT'_{doeq}}{K_{eq}} \Delta E'_q。$$

(10)

等值机参数如下:

$$\frac{1}{\sum_1^n \frac{1}{K_k}} = K_{eq}; \quad K_{eq} \sum_1^n \frac{T'_{dok}}{K_k} = T'_{doeq},$$

(11)

其中 K_{eq} 表示等值机的励磁惯性常数与下垂系数之积, T'_{doeq} 表示等值机的开路时间常数, T'_{dok} 表示第 k 台逆变器的开路时间常数, K_k 表示第 k 台逆变器的励磁惯性常数与下垂系数之积。

2 仿真验证与结果分析

2.1 仿真设置与参数

为验证笔者所提出的适用于虚拟同步机的同调等值方法的正确性和有效性, 在 PLECS 仿真平台上建立了一个具有 10 台逆变器的并联系统, 这些逆变器均采用虚拟同步机算法进行控制。其连接在同一交流母线上共同运行。具体的系统拓扑结构如图 2 所示。系统与逆变器参数如表 1 和表 2 所示。

为模拟小扰动故障, 在仿真中采用了突然将三相电阻接地, 以模拟负荷的突然变化。同时, 基于发电机同调群与扰动无关的假设, 通过小信号计算的分群结果应同样适用于大扰动分群结果。同时, 还进行了切机故障仿真, 以验证在强电网背景下, 每个逆变器的运行状态是否相互独立。利用上述得到的同调群, 笔者建立了逆变器同调群的等效模型, 并使用该模型验证了笔者所提出的聚合方法的有效性。表 1、表 2 中各参数与图 2 对应。

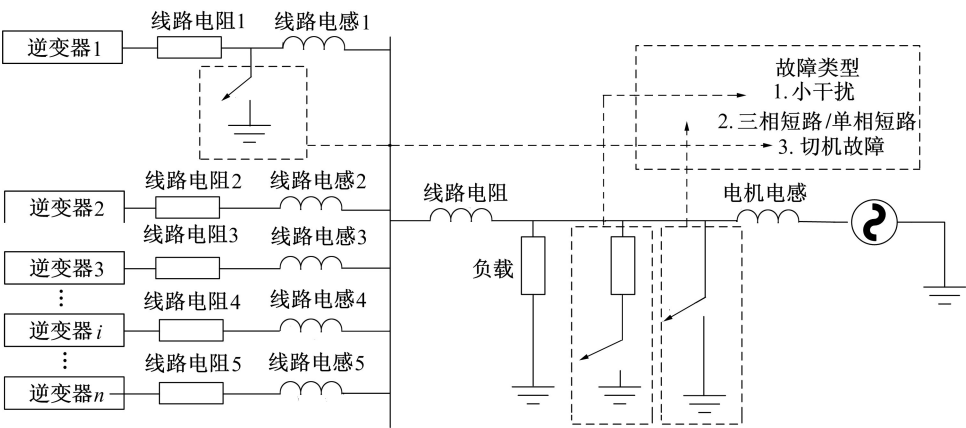


图 2 逆变器扰动模型

Fig. 2 Disturbance model of inverter

表 1 系统参数

Tab. 1 System parameter

参数	R_{g1}/Ω	L_{g1}/mH	R_{load}/Ω	R_{g2}/Ω	L_{g2}/mH	V_g/V
值	0.1	2	60	0.1	1	311

表2 逆变器参数

Tab.2 Inverter parameters

变量	J	D	X	变量	J	D	X
逆变器1	4	400	0.942	逆变器6	4	450	0.942
逆变器2	3	550	1.884	逆变器7	3.5	600	1.256
逆变器3	4.5	350	1.256	逆变器8	4	650	1.56
逆变器4	3.5	400	0.942	逆变器9	4	400	1.884
逆变器5	4	300	0.942	逆变器10	5	350	0.628

2.2 同调算法验证

在模拟小扰动情景下,通过在 R_{load} 处使相同的三相电阻接地模拟系统的行为。由于 J,D,X 3个参数具有不同的量纲和数量级,为消除其影响并进行公平比较,首先将所有参数归一化至 $[0,1]$ 区间。如下:

$$J_{norm,k} = \frac{J_k - J_{min}}{J_{max} - J_{min}}, \quad D_{norm,k} = \frac{D_k - D_{min}}{D_{max} - D_{min}}, \quad X_{norm,k} = \frac{X_k - X_{min}}{X_{max} - X_{min}}, \quad (12)$$

其中 $J_{max}=5, J_{min}=3, D_{max}=650, D_{min}=300, X_{max}=1.884, X_{min}=0.628$,将表2中每个逆变器的参数进行归一化,结果如表3所示。

表3 归一化逆变器参数

Tab.3 Normalized inverter parameters

变量	J_{norm}	D_{norm}	X_{norm}	变量	J_{norm}	D_{norm}	X_{norm}
逆变器1	0.500	0.285 7	0.250	逆变器6	0.500	0.428 6	0.250
逆变器2	0	0.714 3	1.000	逆变器7	0.250	0.857 1	0.500
逆变器3	0.750	0.142 9	0.500	逆变器8	0.500	1.000 0	0.742
逆变器4	0.250	0.285 7	0.250	逆变器9	0.500	0.285 7	1.000
逆变器5	0.500	0	0.250	逆变器10	1.000	0.142 9	0

计算所有逆变器归一化参数的平均值,构成系统参数的中心点,该点代表集群参数的平均水平,得出3个参数的中心点为 $J_{avgnorm}=0.575, D_{avgnorm}=0.514\ 3, X_{avgnorm}=0.574\ 2$ 。分别计算每台逆变器的归一化参数向量到中心点的欧氏距离,以量化其与平均水平的偏离程度。欧氏距离如下:

$$d_k = \sqrt{(J_{norm,k} - J_{avgnorm})^2 + (D_{norm,k} - D_{avgnorm})^2 + (X_{norm,k} - X_{avgnorm})^2}. \quad (13)$$

基于上述分析,逆变器1到参数中心点的欧氏距离为0.403 7,在10台逆变器中排名第2,表明其参数非常接近系统的平均水平,具有良好的代表性。排名第1的逆变器9因其线路电抗 X 为最大值(1.884 Ω),该参数相较于其他参数更为偏离中心。逆变器1的 J,D,X 参数均处于集群的核心分布区域,避免了因单一参数极端而可能引入的偏差。仿真结果表明,以逆变器1为参考机所计算的参数权重进行同调分群,其结果与转子角轨迹的时域仿真高度吻合,进一步验证了该工程选择的正确性与有效性。

综上,笔者选择逆变器1作为参考机,并在其基础上,计算每个参数的权重。这些权重反映了每个参数在扰动情景下对虚拟转子角的影响(见表4)。

表4 各参数对虚拟转子角影响权重

Tab.4 Weights of the influence of various parameters on the virtual rotor angle

参数	J	D	X
权重	-0.97	0.01	-0.26

在对每个参数进行加权后,可以利用 K -means算法对其进行分类。通过将加权后的数据点表示在三维坐标系中,可以进行加权判别同调操作。在加权判别同调后,将同调的逆变器使用相同的颜色表示,以突出其关联性。得到的结果如图3所示。

从图 3 可看出, 1、4、6、9 号逆变器形成了一组同调群, 2、7、8 号逆变器形成了另一组同调群, 而 3、5、10 号逆变器则形成了第 3 组同调群。为验证同调判别方法的正确性, 在稳态后(第 4 s), 笔者施加了单相短路和三相短路故障, 并观察了其转子角运动曲线。有助于验证同调判别方法的准确性和有效性。

从图 4 和图 5 可看出, 同一组同调逆变器在故障期间表现出相似的虚拟转子运动曲线, 可以发现 1、4、6、9 和 2、7、8 及 3、5、10 号逆变器的虚拟转子运动曲线分别具有相同的变化规律, 验证了同调判别方法的准确性。

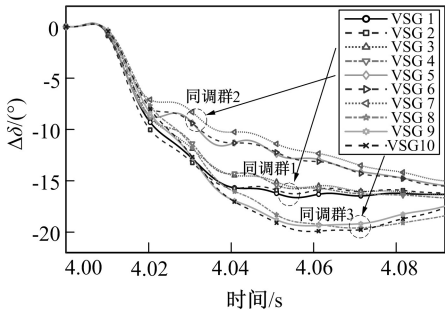


图 4 三相短路逆变器同调群角度偏差示意图
Fig.4 Schematic diagram of homology group angle deviation of three-phase short-circuit inverter

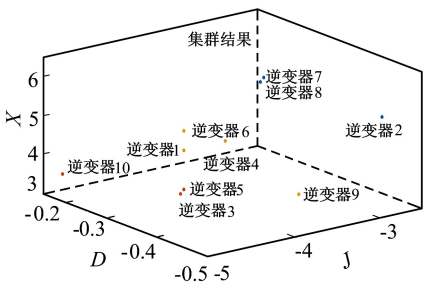


图 3 逆变器同调群示意图
Fig.3 Schematic diagram of inverter homology group

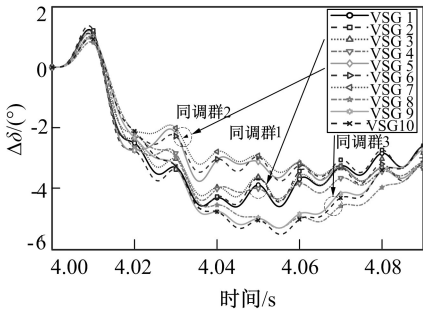


图 5 单相短路逆变器同调群角度偏差示意图
Fig.5 Schematic diagram of homology group angle deviation of single-phase short-circuit inverter

以三相短路为例, 提取最大相对虚拟功角数据, 结果如表 5 所示。

表 5 各逆变器最大相对虚拟功角

Tab.5 Maximum relative virtual power angle of each inverter

	1	4	6	9	2	7	8	3	5	10
1	0	0.5	1.2	1.4	4.7	4.3	5.3	3.2	3.1	3.6
4		0	1.3	1.4	4.6	4.4	5.5	3.5	3.6	4.1
6			0	0.2	3.5	3.2	4.2	3.9	3.8	4.3
9				0	3.2	2.9	4.0	4.1	3.7	3.7
2					0	0.4	1.4	6.4	6.6	7.1
7						0	1.1	6.1	6.4	6.9
8							0	6.9	7.3	7.8
3								0	0.9	1.1
5									0	0.6
10										0

从表 5 可看出, 在同调群内的逆变器, 其间相对虚拟功角满足同调判据, 即最大角度差小于 5°。表明在三相短路故障期间, 同一组同调群内的逆变器的虚拟转子运动曲线变化规律一致, 其相对虚拟功角值相近。验证笔者所提同调判别方法在识别同调逆变器群组方面的正确性和有效性。

2.3 强电网背景下的解耦验证

在稳态运行后进行切机操作, 将第 1 台逆变器切除, 若系统处于强电网环境中, 每个逆变器将独立运行, 而同调结果将保持之前的分群情况, 只是第 1 台逆变器将被排除在外。在系统达到稳态后, 将第 1 台逆变器切除, 各台逆变器的虚拟转子运动曲线如图 6 和图 7 所示。

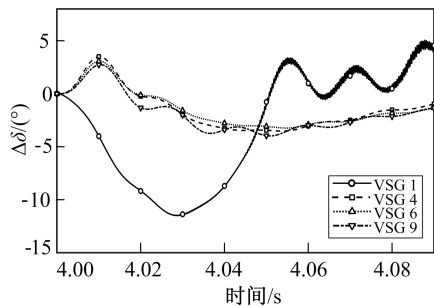


图6 同调群逆变器角度偏差示意图(切一机)

Fig.6 Schematic diagram of angle deviation of coherency group inverter (cutting one machine)

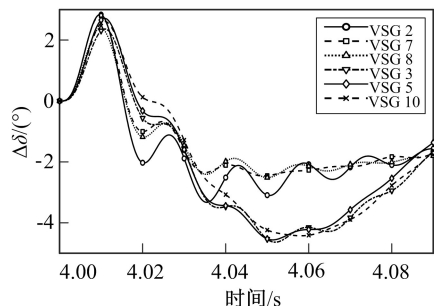


图7 其余同调群角度偏差示意图

Fig.7 Schematic diagram of angular deviation of other homology groups

从图6和图7可看出,切机后原有的同调群仍然保持同调关系,切机操作并没有对同调结果产生影响。从而进一步验证了笔者所提出的强电网树状拓扑背景下各逆变器输出功率彼此解耦假设的正确性。

2.4 等值模型验证

在进行同调分群分析后,根据分群结果进行等值处理,得到3台等值机的参数如表6所示。

表6 同调逆变器群等值参数

Tab.6 Equivalent parameters of coherent inverter group

	J_{eq}	D_{eq}	X_{eq}	T'_{abeq}	K_{Aeq}
等值机组 1	15.5	1 650	0.97	2×10^{-4}	0.025
等值机组 2	10.5	1 800	1.09	2×10^{-4}	0.33
等值机组 3	16	900	1.09	2×10^{-4}	0.33

将各同调群内的机组的功率相加,并与等值机组进行对比,结果如图8所示。提取图8中的数据进行分析,可以得到聚合模型的有功与无功功率的平均误差如表7所示。可以看出,经过等值处理后,逆变器的功率与等值机组较为接近。

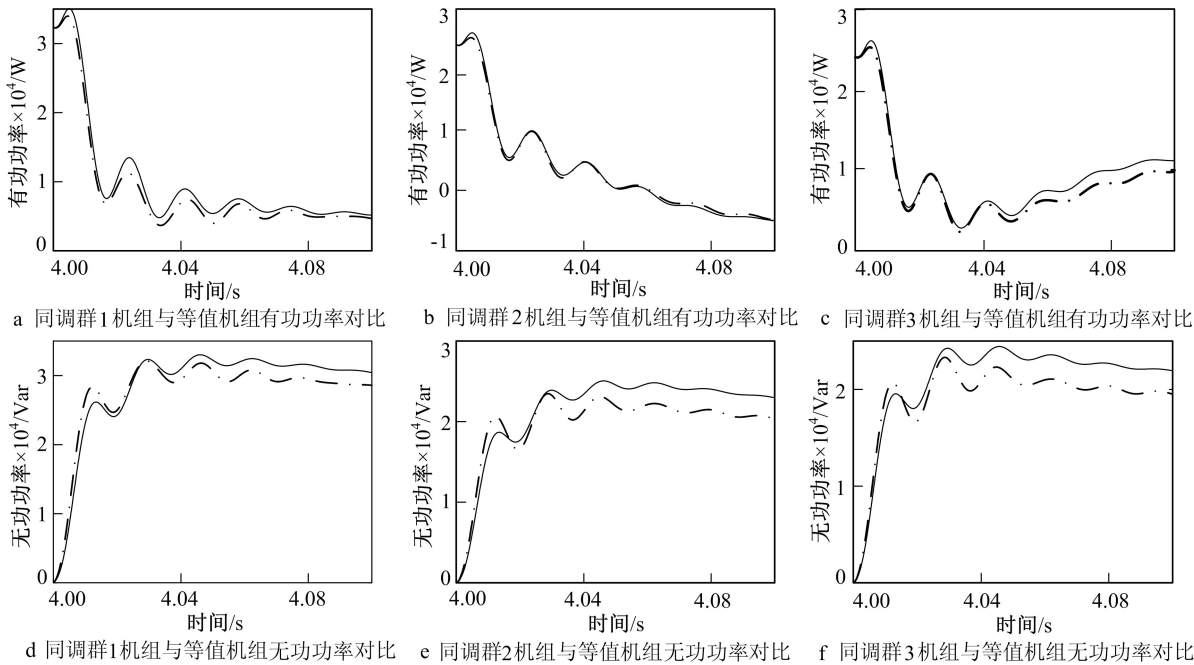


图8 详细模型与等值模型输出功率对比

Fig.8 Comparison of output power between detailed model and equivalent model

表 7 同调逆变器群功率误差

Tab. 7 Power error of coherent inverter group

pu

	有功误差	无功误差		有功误差	无功误差
等值机组 1	0.033 0	0.025 3	等值机组 3	0.038 6	0.070 4
等值机组 2	0.000 6	0.065 1			

上述分析结果表明,虽然仿真系统中设置的线路电阻 R_g 与电抗 X 的比值($R/X\approx0.16\sim0.32$)并未严格满足远小于1的理想条件,但仿真结果表明,在此非理想工况下,基于解耦假设提出的同调识别算法仍能准确划分群组,且等值模型精度满足工程要求。基于笔者所提的同调等值方法可以显著降低系统规模并满足工程精度要求,等值系统可以表征原始系统的动态特性,可用于代替原始系统对研究区域进行动态稳定分析。

3 结 语

笔者提出了适用于虚拟同步发电机(VSG)的同调识别算法。通过对强电网假设和拓扑分析,发现在该拓扑下,逆变器的输出功率是相互解耦的。并据此提出了一种基于参数的同调识别算法。具体操作是,选择一台参考机,提取其参数并计算各参数对虚拟转子角的影响权重,然后采用加权K-means算法识别逆变器的同调群。

此外,还针对现有的同调分析中经常忽略等效电动势对分群结果的影响进行了探索,并提出了适用于VSG的励磁模型。该模型相较于常见的VSG模型具有更明晰的物理意义,并且在扰动情况下表现出良好的稳压效果。最后通过参考有功环节的聚合原则,推导了所提的VSG的聚合算法。

通过仿真验证,得出以下结论:所提同调识别算法能准确识别逆变器的同调群,并且提出的VSG励磁模型在暂态分析中具有较好的稳压特性。其对智能电网和能源互联网具有重要意义,并为相关领域实践提供了有益的启示和指导。

参考文献:

[1] GIUSEPPE FUSCO, MARIO RUSSO. A Decentralized Approach for Voltage Control by Multiple Distributed Energy Resources [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12(1): 3115-3127.

[2] CAI S, ZHANG M L, XIE Y Y, et al. Hybrid Stochastic-Robust Service Restoration for Wind Power Penetrated Distribution Systems Considering Subsequent Random Contingencies [J]. IEEE Transactions on Smart Grid. 2022, 13(4): 2859-2872.

[3] WANG K, YUAN X B, GENG Y W, et al. A Practical Structure and Control for Reactive Power Sharing in Microgrid [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 10(2): 1880-1888.

[4] JIANG Y Z. Data-Driven Fault Location of Electric Power Distribution Systems with Distributed Generation [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 11(1): 129-137.

[5] BISHNU P BHATTARAI, IKER DIAZ DE CERIO MENDAZA, KURT S MYERS, et al. Optimum Aggregation and Control of Spatially Distributed Flexible Resources in Smart Grid [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 9(5): 5311-5322.

[6] YI Z K, XU Y L, GU W, et al. Aggregate Operation Model for Numerous Small-Capacity Distributed Energy Resources Considering Uncertainty [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 12(5): 4208-4224.

[7] MA Z M, ZHENG J H, ZHU S Z, et al. Online Clustering Modeling of Large-Scale Photovoltaic Power Plants [C] //2015 IEEE Power & Energy Society General Meeting. Denver, CO: IEEE, 2015: 1-5.

[8] TANG K, GANESH K VENAYAGAMOORTHY. Online Coherency Analysis of Synchronous Generators in a Power System [C] //ISGT 2014. Washington, DC: IEEE, 2014: 1-5.

[9] LIU H P, LIU J G, ZHANG W. Dynamic Aggregation Modeling for Droop Control Inverter Based on Slow Coherency Algorithm [C] //2021 IEEE 16th Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA). Chengdu: IEEE, 2021: 1-5.

[10] LIU J L, TANG F, ZHAO J B, et al. Coherency Identification for Wind-Integrated Power System Using Virtual Synchronous Motion Equation [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(4): 2619-2630.

[11] PHILIP J HART, ROBERT H LASSETER, THOMAS M JAHNS, et, al. Coherency Identification and Aggregation in Grid-Forming Droop-Controlled Inverter Networks [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2020, 35(3): 2219-2231.

[12]JIANG Y Z, NARESH ACHARYA, PAN Y. Model Reduction for Fast Assessment of Grid Impact of High Penetration PV [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(4): 2619-2630.

[13]XIONG X L, WU C, FREDE BLAABJERG. Effects of Virtual Resistance on Transient Stability of Virtual Synchronous Generators under Grid Voltage Sag [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2022, 69(5): 4754-4764.

[14]HUANG L B , XIN H H, YUAN H Y, et al. Damping Effect of Virtual Synchronous Machines Provided by a Dynamical Virtual Impedance [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2021, 36(1): 570-573.

[15]LI M X, SHU S R, WANG Y, 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.

[16]CHEN S M, SUN Y, HAN H, et al. Dynamic Frequency Performance Analysis and Improvement for Parallel VSG Systems Considering Virtual Inertia and Damping Coefficient [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2023, 11(1): 478-489.

[17]XU H Z, YU C Z, LIU C, et al. An Improved Virtual Inertia Algorithm of Virtual Synchronous Generator [J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2020, 8(2): 377-386.

[18]JIANG K, SU H S, LIN H J, et al. A Practical Secondary Frequency Control Strategy for Virtual Synchronous Generator [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(3): 2734-2736.

(责任编辑:张洁)