

控制与决策

Control and Decision



基于虚拟角急动度并网控制策略

杜衡, 程启富, 孙秋野, 马大中, 王旭

引用本文:

杜衡, 程启富, 孙秋野, 等. 基于虚拟角急动度并网控制策略[J]. 控制与决策, 2021, 36(5): 1268–1272.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1030>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于虚拟结构法的多移动机器人分布式预测控制

Distributed predictive control of multiple mobile robots based on virtual structure method

控制与决策. 2021, 36(5): 1273–1280 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1136>

输出误差约束下四旋翼无人机预定性能反步控制

Prescribed performance backstepping control for quadrotor UAV with output error constraint

控制与决策. 2021, 36(5): 1059–1068 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1249>

并网逆变器分数阶虚拟惯性的虚拟同步发电机控制技术

Virtual synchronous generator control technology with fractional virtual inertia for grid-connected inverters

控制与决策. 2021, 36(2): 463–468 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0391>

一种反向递推正弦干扰观测器的设计方法

Design method of reverse recursive sinusoidal disturbance observer

控制与决策. 2021, 36(2): 403–410 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0769>

十字形二维稀疏混合MIMO相控阵雷达收发阵列设计

Joint design of transceiver array for cross-shaped two-dimensional sparse hybrid MIMO phased array radar

控制与决策. 2020, 35(12): 2875–2882 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0221>

基于虚拟角急动度并网控制策略

杜 衡, 程启富, 孙秋野[†], 马大中, 王 旭

(东北大学 信息科学与工程学院, 沈阳 110004)

摘 要: 提出一种基于虚拟角急动度的并网控制策略, 这种控制策略结合了下垂控制和虚拟同步机控制的优点. 虚拟角急动度控制是模拟物理运动中的加速和减速过程, 当电网频率或者负载出现瞬时波动时, 并网逆变器频率调节按照给定频率加速和减速曲线变化, 使得并网控制拥有和虚拟同步机一样的惯性和阻尼特性. 对比分析下垂控制、虚拟同步机控制和虚拟角急动度控制的传递函数, 说明虚拟角急动度不仅具备惯性环节, 并且其动态调节时间是可量化的. 通过状态方程的稳定性分析, 验证虚拟角急动度拥有良好的稳定性能. 仿真实验结果表明, 虚拟角急动度控制算法在负荷波动时具有良好的惯性和阻尼特性, 能有效抑制微网频率的波动, 并确保微网的可靠运行.

关键词: 虚拟角急动度; 虚拟同步电机; 下垂控制; 分布式发电系统; 功率均分

中图分类号: TP273

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2019.1030

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



引用格式: 杜衡, 程启富, 孙秋野, 等. 基于虚拟角急动度并网控制策略[J]. 控制与决策, 2021, 36(5): 1268-1272.

Grid connected strategy based on virtual angular jerk

DU Heng, CHENG Qi-fu, SUN Qiu-ye[†], MA Da-zhong, WANG Xu

(College of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110004, China)

Abstract: This paper presents a grid control strategy based on virtual angular jerk (VAJ), which combines the advantages of droop control and virtual synchronous generator (VSG) control. The VAJ can mimic the acceleration and deceleration process of physical motion. Thus, while handling the instantaneous fluctuation on the grid frequency or load, the inverter in the proposed approach can adjust the output frequency corresponding to the reference acceleration and deceleration curve to obtain the same inertia and damping characteristics as the synchronous machine. The transfer functions of droop control, VSG control and VAJ control are compared and analyzed, which indicates that the VAJ has inertia and the response time is adjustable. Through the stability analysis of the equation of state, the VAJ control strategy has excellent static stability performance. Finally, the simulation experiment verifies that the VAJ control strategy has excellent transient and dynamic performance when the load or power grid frequency fluctuates, which can effectively suppress the fluctuation of micro grid and ensure the operation reliability of micro grid.

Keywords: virtual angular jerk (VAJ); virtual synchronous generator (VSG); droop control; distribution generation system (DGS); power distribution

0 引言

智能电网是传统的主电网与微网组成的复合型电网, 其中微网^[1]包括交流或者直流的分布式发电系统(DGS)、储能设备、负载, 以及基于逆变器或整流器为接口的能量转换装置. 文献[2]讨论了微电网的分层控制架构, 其中第2层控制采用下垂控制保持电压和频率的稳定并且被广泛应用于微网的无通信控制中. 由于低压微网的线路传输阻抗呈阻性, 而下垂控制的前提条件是线路阻抗为感性, 这样才能保持频率

与有功、电压与无功的线性关系. 文献[3]引入虚拟阻抗控制, 使得下垂控制适用于线路阻抗呈阻性的低压微电网.

由于下垂控制没有惯性和阻尼特性, 当电网负载出现波动时容易出现振荡, 基于这个原因, 提出了虚拟同步机(VSG)控制^[4-7]. 虚拟同步机控制虽然使并网逆变器控制具备了同步发电机的惯性和阻尼特性, 但是其动态调节时间较为缓慢, 同时调节时间是无法量化控制的. 另外, 由于存在一阶惯性环节, 在功率调

收稿日期: 2019-07-18; 修回日期: 2019-10-19.

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFA0702200); 国家自然科学基金重点项目(61433004); 国家自然科学基金项目(61573094, 61773109); 辽宁省“兴辽英才计划”项目(XLYC1807009).

[†]通讯作者. E-mail: sunqiuye@ise.neu.edu.cn.

节的暂态过程中,每一个逆变器机组的功率分配并非是按比例控制的。

基于以上问题,本文提出一种基于虚拟角急动度控制算法。急动度是一种特殊运动的力学术语,即加速度随时间的变化率,也就是加速度的时间导数,或者是速度的二阶导数,位置的三次导数。在运动控制领域急动度也是一个非常重要的参数,机器人^[8]和无人机^[9]最优控制策略通过控制急动度进而控制速度或者加速度最优曲线来实现运动的最优控制。文献^[10]把急动度的控制应用到滑模控制领域中代替传统的PID控制。本文把运动的控制领域急动度概念应用到电力系统领域,基于虚拟角急动度并网控制算法是通过控制虚拟角急动度来模拟物理运动中加速和减速过程,使得逆变器拥有同步电机的惯性和阻尼特性。当电网频率或者负载出现瞬时波动时,并网逆变器频率的调节按照给定频率加速和减速曲线变化,使得并网控制拥有和虚拟同步机一样的惯性和阻尼特性,从而控制多个逆变器按照同一个设定固定时间一起变化,可以实现频率调节时间精准控制,也可以控制频率和功率波动速率,无需阻尼系数 D ,并且简化功率和角速度的关系。当虚拟角急动度增加时,调整时间减小,频率变化快速。反之,当虚拟角急动度减小时,调整时间增加,频率变化缓慢。

1 虚拟角急动度(VAJ)并网控制策略

下垂控制主要是基于 P - ω 和 Q - V 控制方法,模拟传统同步发电机一次调频特性和一次调压特性,使得并网逆变器拥有与传统同步发电机一样的频率和电压的外特性,下垂控制表达式如下:

$$\begin{cases} \omega = \omega_0 - m_p(P - P_0), \\ V = V_0 - n_q(Q - Q_0). \end{cases} \quad (1)$$

由于下垂控制没有惯性和阻尼特性,当电网负载出现波动时容易出现振荡。基于这个原因,提出虚拟同步机控制,下式为虚拟同步机的控制方程:

$$\begin{cases} T_m - T_s = J_0 \frac{d\omega}{dt} + D_0(\omega - \omega_g), \\ T_m = \frac{P_m}{\omega} \approx \frac{P_m}{\omega_0}, \\ T_e = \frac{P_e}{\omega} \approx \frac{P_e}{\omega_0}. \end{cases} \quad (2)$$

其中: P_m 是虚拟同步电动机的机械功率; P_e 是虚拟同步电动机电磁功率,等于逆变器的实际输出功率 P ; ω 是虚拟同步电动机的电角速度; ω_g 是电网角频率; ω_0 是逆变器控制的额定角频率,由于电网频率波动很小,在做转矩和频率转换时, ω 可以用 ω_0 代替。虚

拟同步电机的电磁功率、机械功率和频率的关系整理如下:

$$P_m - P_e = J_1 \frac{d\omega}{dt} + D_1(\omega - \omega_g). \quad (3)$$

其中: $J_1 = \omega_0 J_0$, $D_1 = \omega_0 D_0$ 。

对式(3)进行拉普拉斯变换可以得到

$$\begin{cases} P_m - P_e = (J_1 s + D_1)(\omega - \omega_g), \\ \Delta\omega = \frac{\Delta P}{J_1 s + D_1}. \end{cases} \quad (4)$$

通过式(4)可以看出,功率的变化和频率的变化呈现一阶惯性关系,正是因为这种关系,当负载突变或者短路时,使得逆变器频率缓慢变化,从而抑制系统振荡和保证暂态过程稳定。但是VSG调节时间很难量化,并且多个DGS在调节过程不同步,导致暂态的过程造成电网功率和频率的波动。

基于以上问题,本文提出一种基于虚拟角急动度并网控制算法,方程如下:

$$P_m - P_e = J_2 \frac{d\omega}{dt}, \quad (5)$$

其中 J_2 是虚拟角急动度运动方程的惯性系数。对式(5)进行差分方程变换,得到

$$\frac{\Delta\omega}{\Delta P} = \frac{1}{J_2} \Delta t. \quad (6)$$

其中: $\Delta\omega$ 是角速度的变化量, ΔP 是功率变化量。为了实现过渡时间的精准控制,需要让功率给定的变化量与时间的变化量成正比关系,假定 $\Delta P = k\Delta t$,代入式(6)为

$$\Delta\omega = \frac{k}{J_2} \Delta t^2. \quad (7)$$

对式(7)进行二阶微分,有

$$\frac{d^2\omega}{dt^2} = \frac{2k}{J_2} = J_{\omega k}, \quad (8)$$

其中 $J_{\omega k}$ 是虚拟角急动度。

由式(8)所示,当虚拟角急动度为常量时,虚拟输入的机械功率与输入到电网的功率之差与时间成线性关系,也就是功率变化量是时间的线性函数。

表1 下垂控制、虚拟同步机控制与虚拟角急动度控制传递函数与时域对比

控制方式	传递函数	时域关系
下垂控制	$\frac{\Delta\omega}{\Delta P} = \frac{m_p}{s}$	$\frac{\Delta\omega}{\Delta P} = m_p$
虚拟同步机控制	$\frac{\Delta\omega}{\Delta P} = \frac{1}{J_1 s + D_1}$	$\frac{\Delta\omega}{\Delta P} = \frac{1}{D_1} e^{-\frac{\Delta t}{T_1/D}}$
虚拟角急动度控制	$\frac{\Delta\omega}{\Delta P} = \frac{1}{J_2 s}$	$\Delta\omega \Delta P = \frac{1}{J_2} \Delta t$

表1总结了下垂控制、虚拟同步机控制和虚拟角急动度控制传递函数与时域对比关系。传统的下垂控制中,虚拟输入的机械功率与输入到电网的功率之

通过控制框图2可以看出,给定不同的角急动度 $J_{\omega k}$, 频率根据不同的曲线进行调节, 最终实现惯性和阻尼特性。

2 虚拟角急动度控制稳定性分析

虚拟角急动度的输出功率的方程为

$$P_e = \frac{VV_g \sin \delta}{X} = P_e(\delta). \quad (11)$$

其中: V 是逆变器输出电压, V_g 是电网电压, X 是电网与逆变器的连接电抗。

假设线路阻抗为感性, 可以将 $P_e(\delta)$ 代入虚拟角急动度控制运动方程, 得到虚拟角急动度控制运动的状态方程

$$\begin{cases} \frac{d\delta}{dt} = \omega - \omega_0, \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J_2} (P_m - P_e(\delta)). \end{cases} \quad (12)$$

由于 $P_e(\delta)$ 中含有 $\sin \delta$, 方程组是非线性的. 若扰动非常小, 则可以在平衡点 δ_0 附近将其展开成泰勒级数, 如下所示:

$$\begin{aligned} P_e(\delta) &= P_e(\delta_0 + \Delta\delta) = \\ P_e(\delta_0) &+ \frac{dP_e}{d\delta} \Big|_{\delta=\delta_0} \Delta\delta + \frac{1}{2!} \frac{d^2 P_e}{d\delta^2} \Big|_{\delta=\delta_0} \Delta\delta + \dots \end{aligned} \quad (13)$$

省略二次项以及高次项, 得到

$$\begin{aligned} P_e(\delta) &= P_e(\delta_0) + \frac{dP_e}{d\delta} \Big|_{\delta=\delta_0} \Delta\delta = \\ P_e(\delta_0) &+ \Delta\delta P'_e(\delta_0) = P_e(\delta_0) + \Delta P_e, \end{aligned} \quad (14)$$

其中略去功角的偏差和二次项以及高次项实质上是用平衡点的切线代替原来功率曲线. 把式(14)代入(12)中, 并对(12)进行小信号分析, 得出矩阵形式为

$$\begin{bmatrix} \frac{d\Delta\delta}{dt} \\ \frac{d\Delta\omega}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{P'_e(\delta_0)}{J_1} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\delta \\ \Delta\omega \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} \Delta\delta \\ \Delta\omega \end{bmatrix}. \quad (15)$$

由 $\det[\lambda - A] = 0$ 可得矩阵 A 的特征根为

$$\lambda_{1,2} = \pm \sqrt{-\frac{P'_e(\delta_0)}{J_1}}. \quad (16)$$

其中: $P'_e(\delta_0)$ 在电力系统被称为整步功率系数, 其大小可以说明发电机维持同步运行的能力, 这里用于虚拟角急动度稳定性判断条件. 当 $P'_e(\delta_0) < 0$ 时, 系统有两个实根, 其中一个为正值, 所以系统不稳定, 这时 $\delta \geq 90^\circ$. 当 $P'_e(\delta_0) > 0$ 时, 系统有两个共轭的虚根, 从理论上分析, 系统处于临界稳定, 考虑到线路阻抗, 系统是稳定的, 这时 $\delta < 90^\circ$.

基于以上分析, 虚拟角急动度静态稳定性判定的

条件与虚拟同步控制以及传统的电力系统同步发电机的判定条件是一样的。

3 仿真分析

基于以上理论分析可以建立虚拟角急动度算法的仿真模型, 虚拟角急动度参数为 12.5 时, 3 组 DGS 的输出功率曲线以及交流母线处频率的变化曲线如图 3 所示, 虚拟角急动度参数为 3.125 时, 3 组 DGS 的输出功率曲线以及交流母线处频率的变化曲线如图 4 所示, 仿真模型具体的仿真参数如表 2 所示. 通过仿真结果对比分析 $J_{\omega k}$ 变化时, 多机组功率均分的功率和频率特性, 从而对上文的理论分析进行验证。

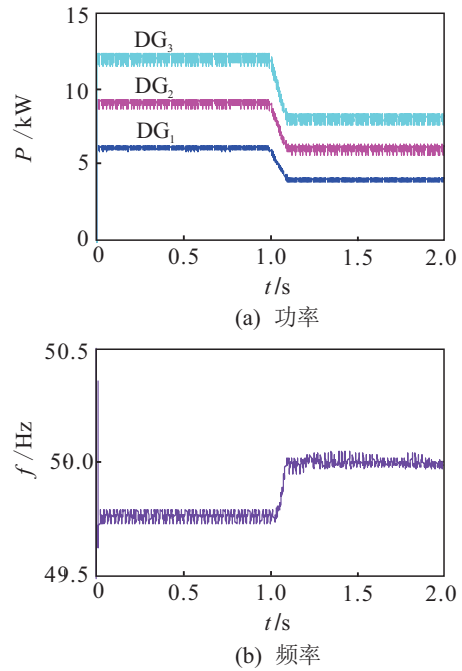


图 3 3组DGS机组功率和频率对比(参数为12.5)

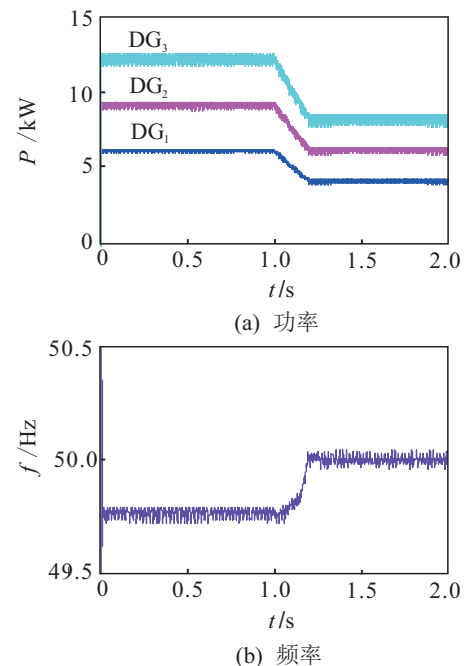


图 4 3组DGS机组功率和频率对比(参数为3.125)

表2 虚拟角急动度仿真参数

机组	参数	数值/kW	图3	图4
DG ₁	$P_{\max}$	8	$J_{wk1}, 12.5$	$J_{wk1}, 3.125$
DG ₂	$P_{\max}$	12	$J_{wk2}, 12.5$	$J_{wk2}, 3.125$
DG ₃	$P_{\max}$	16	$J_{wk3}, 12.5$	$J_{wk3}, 3.125$

由图3可以看出,在初始时刻DG₁、DG₂和DG₃的输出功率分别为6kW、9kW和12kW,在1s时刻由于系统负荷下降,3组DGS输出功率下降,在0.1s后,3组DGS输出功率达到稳态,分别为4kW、6kW和8kW,其功率分配比为1:1.5:2. 交流母线处的频率变化曲线呈二次函数趋势,同时在0.1s内从49.75Hz上升到50Hz.

由图4可以看出,3组DGS机组的功率分配比为1:1.5:2. 交流母线处的频率变化曲线呈二次函数趋势,同时在0.2s内从49.75Hz上升到50Hz.

综合以上:当虚拟角急动度参数为12.5时,调整时间为0.1s;当虚拟角急动度为3.125时,调整时间为0.2s. 仿真实验验证了虚拟角急动度参数 J_{wk} 与调节时间成反比. 当电网输出功率变化时,通过调节VAJ中的虚拟角急动度参数 J_{wk} 可以实现对于频率调节的时间设定,从而达到一个频率动态响应的最佳控制值.

4 结 论

以上理论分析和仿真实验表明,所提出的虚拟角急动度算法是一种新型并网控制算法,并且拥有比VSG控制算法更优的动态特性.

1) 在没有互联信号的情况下,过渡过程能够实现不同DGS之间功率精准分配. 功率按照给定的线性曲线变化,从而避免了在动态过程中由功率分配不均带来的振荡.

2) VAJ需要一个虚拟角急动度参数就可以实现VSG的惯性和阻尼特性,而VSG需要同时调节虚拟惯性和虚拟阻尼系数. 当角急动度增加时,调整时间减小,频率变化快速. 反之,调整时间增加,频率变化缓慢. 并且VAJ频率的调节时间是可以很精确地控制,而VSG频率调节时间不可以精确控制. 在多个并网单元协调控制时,VAJ控制算法可以让所有并网单元频率调节同步稳定.

3) 通过特征根的分布可知,当 $P'_e(\delta_0) > 0$ 时,虚拟角急动度控制是稳定的.

总之,虚拟角急动度控制算法把运动控制的理论应用到电力系统领域,使并网逆变器带有传统同步发电机的惯性和阻尼特性,从而抑制在动态过程中电网的频率和功率的振荡,保证逆变器工作在稳定状态.

参考文献(References)

- [1] Venayagamoorthy G K, Sharma R K, Gautam P K, et al. Dynamic energy management system for a smart microgrid[J]. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, 2016, 27(8): 1643-1656.
- [2] Guerrero J M, Chandorkar M, Lee T L, et al. Advanced control architectures for intelligent microgrids—Part I: Decentralized and hierarchical control[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(4): 1254-1262.
- [3] Paquette A D, Divan D M. Virtual impedance current limiting for inverters in microgrids with synchronous generators[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2015, 51(2): 1630-1638.
- [4] Zhong Q C, Weiss G. Synchronverters: Inverters that mimic synchronous generators[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(4): 1259-1267.
- [5] Zhong Q C. Virtual synchronous machines and autonomous power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(2): 336-348.
- [6] Liu J, Miura Y, Bevrani H, et al. Enhanced virtual synchronous generator control for parallel inverters in microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 8(5): 2268-2277.
- [7] Wu H, Ruan X B, Yang D S, et al. Small-signal modeling and parameters design for virtual synchronous generators[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(7): 4292-4303.
- [8] Gasparetto A, Zanutto V. A technique for time-jerk optimal planning of robot trajectories[J]. Robotics and Computer Integrated Manufacturing, 2008, 24(3): 415-426.
- [9] Phang S K, Lai S, Wang F, et al. Systems design and implementation with jerk-optimized trajectory generation for UAV calligraphy[J]. Mechatronics, 2015, 30: 65-75.
- [10] Fang J H, Guo F, Chen Z, et al. Improved sliding-mode control for servo-solenoid valve with novel switching surface under acceleration and jerk constraints[J]. Mechatronics, 2017, 43: 66-75.

作者简介

杜衡(1981—), 男, 博士生, 从事智能电网控制的研究, E-mail: duheng_0430@163.com;

程启富(1993—), 男, 工程师, 从事电力电子的研究, E-mail: lowkeycheng@163.com;

孙秋野(1977—) 男, 教授, 博士生导师, 从事网络控制技术、分布式控制技术、分布式优化分析及其在能源互联网、微网、配电网等领域相关应用等研究, E-mail: sunqiuye@ise.neu.edu.cn;

马大中(1982—), 男, 副教授, 博士生导师, 从事故障诊断、容错控制、能源管理系统以及分布式发电系统、微网和能源互联网的优化与控制等研究, E-mail: madazhong@ise.neu.edu.cn;

王旭(1956—), 男, 教授, 博士生导师, 从事智能控制、检测技术、电力传动等研究, E-mail: wangxu@ise.neu.edu.cn.

(责任编辑: 闫 妍)