

基于自适应惯量阻尼综合控制算法的 虚拟同步发电机控制策略

李东东^{1,2}, 朱钱唯¹, 程云志³, 刘庆飞¹, 林顺富^{1,2}, 杨帆^{1,2}, 边晓燕^{1,2}

(1. 上海电力学院 电气工程学院, 上海 200090; 2. 上海高校高效电能应用工程研究中心, 上海 200090;

3. 美国德州电力可靠性委员会, 美国 泰勒 76574)

摘要: 在逆变控制领域, 虚拟同步发电机(VSG)控制策略可解决分布式能源并网系统缺少惯性的问题来有效支撑电网频率, 然而现有 VSG 控制手段往往忽略了阻尼的作用。为进一步提升 VSG 对频率稳定性的贡献, 在传统 VSG 控制策略的基础上, 结合力学原理证实了 VSG 虚拟惯量可进行实时变化的可行性, 分析了同步发电机转子惯量和阻尼系数与系统频率稳定性的关系, 并设计了一种自适应惯量阻尼综合控制(SA-RIDC)算法, 实现了虚拟转动惯量与虚拟阻尼的交错控制。通过 MATLAB/Simulink 仿真工具, 将所提出的 SA-RIDC 算法与传统固定惯量阻尼控制和自适应惯量控制进行对比, 结果表明 SA-RIDC 算法在改善系统频率稳定性方面有着显著的效果。

关键词: 虚拟同步发电机; 频率稳定性; 阻尼; 转子惯量; 自适应控制

中图分类号: TM 761

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2017.11.012

0 引言

随着传统能源的枯竭, 以新能源为主体的分布式发电 DG(Distributed Generation)逐渐兴起^[1-3]。绝大多数分布式能源接入电网时需要并网逆变器作为接口, 而逆变器往往存在着过载能力差、输出阻抗小和几乎不存在惯性等缺点^[4]。

传统电力系统中, 多以大型同步发电机为主要电源。由于同步发电机的转子存在惯性, 因此当电力系统发生负荷突变或发电机跳闸时, 正常运行的同步发电机会通过释放转子动能缓慢弥补功率缺额, 以抑制频率的快速变化, 达到维持电网安全稳定的目的。然而, 作为以逆变控制为核心的 DG 系统, 其惯性的缺失会导致在系统发生扰动时各电能参数的过快响应。其中, 系统频率的突变会影响配电网甚至电网的安全稳定运行。

针对上述缺陷, 文献[5]最早提出了虚拟同步发电机 VSG(Virtual Synchronous Generator)的概念, 它借鉴了同步发电机的电磁与机械方程, 从外特性上成功等效了同步发电机的模型, 为逆变器增加了惯性支撑。为了改善 VSG 系统的频率稳定性, 学术界针对 VSG 的调速器与本体控制器进行了相关研究。文

献[6]结合了传统电网的二次调频, 实现了 VSG 控制中频率的无差调节, 但采用分散式调频中的 PI 参数不易精确选取。文献[7]提出了自适应调节的 VSG 频率控制策略, 解决了二次调频下 PI 参数难以精确选取的问题。然而, 文献[6-7]均是在孤岛情况下进行频率的稳定性控制, 并没有考虑并网时的频率稳定性控制。文献[8-9]针对 VSG 并网时出现的有功功率振荡问题提出了一种自适应虚拟惯性控制算法, 可根据 VSG 虚拟角速度的变化自适应地改变虚拟转子惯量。与此类似, 文献[10]也采用了一种自适应转子惯量算法, 综合考虑了 VSG 虚拟加速度与虚拟角速度偏差, 并有效改善了并网情况下的频率稳定性。上述文献考虑了虚拟转动惯量, 却忽视了 VSG 系统的虚拟阻尼对频率稳定性的作用。

虚拟惯量和虚拟阻尼是 VSG 系统中的核心变量^[11], 它们的引入从真正意义上模拟了同步发电机的机理。然而, 现有文献大多只考虑了虚拟惯量对频率稳定性的影响。因此, 本文总结了同步发电机转子惯量和阻尼系数与频率稳定性间的关系, 结合力学原理证实了 VSG 虚拟惯量可以进行实时变化的可行性, 并探讨了阻尼系数对频率稳定性的作用。为取得更好的系统动态性能, 本文提出了一种自适应惯量阻尼综合控制 SA-RIDC(Self-Adaptive Rotor Inertia and Damping Combination control)算法。最后, 利用 MATLAB/Simulink 进行仿真实验, 与传统算法和采用自适应虚拟惯量的算法进行对比, 验证了所提算法的优越性。

1 VSG 控制策略的基本原理

1.1 逆变系统与同步发电机模型的等效

VSG 是微电网逆变控制策略的一种, 本质是通

收稿日期: 2016-10-24; 修回日期: 2017-08-08

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51507100, 51407114); 上海市科学技术委员会资助项目(15YF1404600, 13DZ2251900, 10DZ2273400); 上海市教育发展基金会和上海市教育委员会“曙光计划”资助项目(15SG50)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51507100, 51407114), the Science and Technology Commission of Shanghai Municipality(15YF1404600, 13DZ22-51900, 10DZ2273400) and “Shuguang Program” of Shanghai Education Development Foundation and Shanghai Municipal Education Commission(15SG50)

过逆变器^[12]实现对同步发电机的模拟。其等效拓扑结构如图 1 所示。

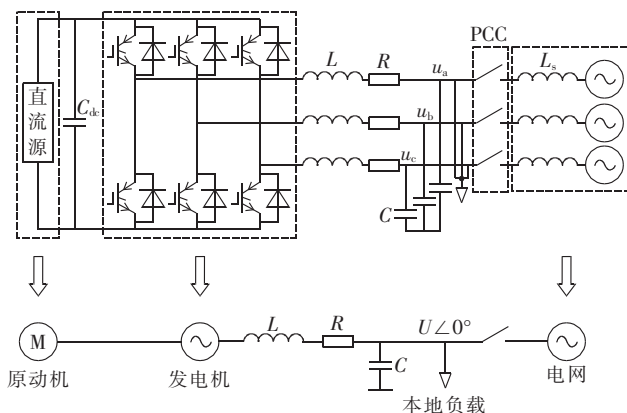


图 1 VSG 结构

Fig.1 Configuration of VSG

微网新能源在图 1 中等效为逆变器的直流侧,在传统电网中可替代为原动机;逆变控制系统可等效成同步发电机;并网输出滤波电感视为同步发电机同步电感;逆变器与滤波电感的等效电阻等效为同步发电机同步电阻。

1.2 VSG 本体模型与整体控制结构的搭建

同步发电机根据不同程度的简化,可分为二阶、三阶、五阶模型等。若以同步发电机二阶模型作为 VSG 本体的控制模型,可以在保留其重要特性的同时有效避免电磁耦合关系的分析。

本文采用二阶模型,等效转子运动方程如式(1)所示。为方便计算,取同步发电机极对数为 1,且由于同步发电机输出频率变化微小,式(1)的近似处理成立。

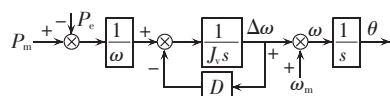
$$\begin{cases} P_m - P_e - D\Delta\omega = J_r \omega \frac{d\omega}{dt} \approx J_r \omega_0 \frac{d\Delta\omega}{dt} \\ \omega = \frac{d\theta}{dt} \end{cases} \quad (1)$$

其中, P_m 、 P_e 分别为同步发电机机械功率、电磁功率; ω 为同步发电机电角速度,在极对数为 1 的情况下,电角速度与机械角速度 ω_m 相等; ω_0 为额定电角速度; $\Delta\omega$ 为同步电角速度与额定电角速度之差; J_r 、 D 分别为同步发电机转动惯量、阻尼系数; θ 为电角度。

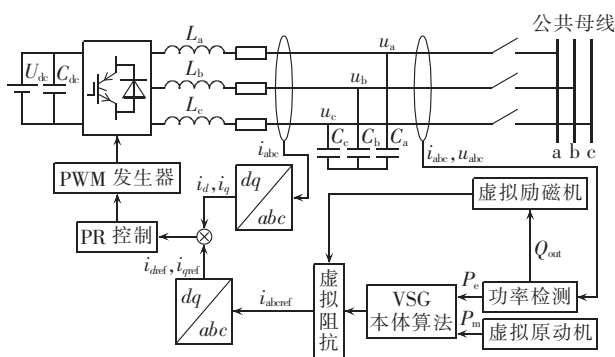
式(1)模拟了同步发电机的本体特性。VSG 转动惯量 J_r 和 D 的引入对于微电网系统的频率稳定性具有重要的改善作用。

VSG 本体模型控制框图、VSG 整体控制框图如图 2 所示。为了更好地研究所提算法,本文忽略了储能及分布式能源的动态响应特性,用直流电压源代替。

如图 2 所示,输入机械功率 P_m 与输入电磁功率 P_e 分别由虚拟原动机控制器和 VSG 实际输出有功



(a) VSG 本体模型控制框图



(b) VSG 整体控制框图

图 2 VSG 本体模型和 VSG 整体控制图

Fig.2 Ontology model and overall control diagram of VSG

功率提供。虚拟原动机控制器通过引入下垂特性,可模拟同步发电机的一次调频作用。本体模型输出的电角度 θ 与虚拟励磁机控制器输出的虚拟励磁电动势幅值 E 通过虚拟阻抗并输出三相调制波电流,通过比例谐振(PR)调节后,最终经脉宽调制(PWM)发生器产生脉冲以控制开关管的开断,实现 VSG 系统的控制。

2 VSG 的 SA-RIDC 算法

2.1 虚拟转动惯量的可变性

通过对同步发电机模型特性的分析,总结了 VSG 虚拟惯量与频率动态稳定性的关系。同时,应用力学原理对同步发电机模型机理进行深入研究^[13],得到虚拟惯量在扰动后可以自适应变化的依据。

转动惯量是同步发电机转子旋转特性的体现,若无特殊情况,发电机转子作为形状规则的均质钢体,其转动惯量可用式(2)描述。

$$J_r = \int r^2 dm \quad (2)$$

其中, r 为同步发电机转子半径; m 为同步发电机转子质量。

转子存储动能的表达式为:

$$E_r = \frac{1}{2} J_r \omega^2 \quad (3)$$

E_r 可缓慢平抑负荷扰动后出现的功率缺额,是发电机一次调频前支撑系统频率的保证。

由式(3)可得发电机转子运动方程为:

$$P_m - P_e - D\Delta\omega = \frac{d(J_r \omega^2 / 2)}{dt} \approx J_r \omega_0 \frac{d\Delta\omega}{dt} \quad (4)$$

继续对式(4)作相应变化可得:

$$\frac{T_m - T_e - T_D}{J_r} = \frac{d\Delta\omega}{dt} \quad (5)$$

其中, $T_m - T_e - T_D = (P_m - P_e - D\Delta\omega) / \omega_0$, T_m 、 T_e 、 T_D 分别为同步发电机的机械转矩、电磁转矩和阻尼转矩。

对式(5)进行理论分析可知:当 $T_m - T_e - T_D$ 一定时,系统角频率的变化率与转动惯量成反比,即转动惯量越大,系统角频率变化率就越小,反之同理。值得注意的是,即使大的惯性有助于提高微网系统频率稳定性,惯性量的选取也不宜过大,否则容易使系统频率发生振荡。

将式(4)的 $P_m - P_e - D\Delta\omega$ 定义为 P_{vac} ,可得:

$$P_{vac} = J_r \omega_0 \frac{d\Delta\omega}{dt} \quad (6)$$

其中, P_{vac} 为同步发电机平抑的功率缺额。

因此,可计算同步发电机平抑功率缺额所需的动能为:

$$E_{vac} = \int_{t_0}^{t_1} P_{vac}(t) dt \quad (7)$$

其中, $t_1 - t_0 = t_{\text{trans}}$ 为负荷扰动后的暂态持续时间。

将上述同步发电机机理用于 VSG 时,可得:

$$E_{Vvac} = \frac{1}{2} (J_v \omega_0^2 - J_v \omega_1^2) \quad (8)$$

其中, E_{Vvac} 为 VSG 平抑功率缺额所需动能; J_v 为 VSG 转动惯量。但同步发电机的转动惯量 J_r 不适用于此公式,因为 J_r 与转子角速度无关,只取决于转子的物理特性。

式(8)经变换可得虚拟转动惯量 J_v 的表达式:

$$J_v = \frac{2E_{Vvac}}{\omega_0^2 - \omega_1^2} \quad (9)$$

由式(9)可知,若 E_{Vvac} 为定值,则在负荷扰动程度变化后, J_v 的数值也会相应改变。

综上分析,VSG 虚拟转动惯量的性质与实际同步发电机的转动惯量不同。同步发电机的转动惯量属于转子特性,为恒定常数;而 VSG 的虚拟转动惯量为虚拟量,可以自适应改变。上述从机理上证实了 VSG 虚拟惯量进行自适应变化的可行性。

2.2 自适应转动惯量原理

当并网 VSG 系统发生负荷扰动时,系统频率会在扰动的瞬间出现振荡,而振荡的超调量与趋于稳定的调整时间(频率进入并不再离开稳定区间的时间)是判断频率稳定性的关键指标。当系统发生扰动时,同步发电机的输出功率与频率都会相应变化,由功角特性可知,当给定功率变化时,功角会进行重复的衰减振荡过程^[10]。进一步地,分析如图 3 所示的转子角频率和转子角频率变化率曲线可知,转子角速度也会有一定程度的衰减振荡过程。

图 3 为 VSG 采用固定转动惯量阻尼控制的仿真结果,在此将其作为分析虚拟转子角频率与虚拟转子角频率变化率的关系实例。图 3(b)中的一个振荡周期可分为 4 个区间: $t_0 - t_1$ 、 $t_1 - t_2$ 、 $t_2 - t_3$ 、 $t_3 - t_4$ (区间

序号记为 1、2、3、4),由于每个区间的频率变化率与频率偏差的对应关系不同,需要的虚拟惯量也不同。

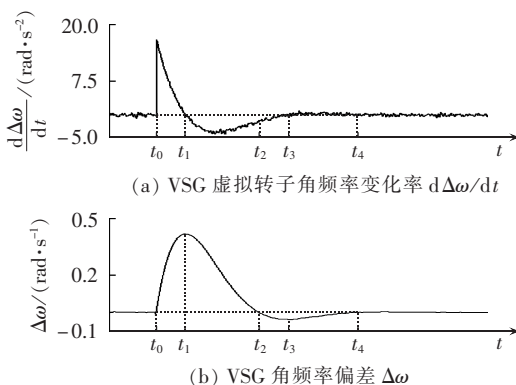


图 3 单个扰动周期内 $d\Delta\omega/dt$ 和 $\Delta\omega$ 的变化曲线图

Fig.3 Relationship between $d\Delta\omega/dt$ and $\Delta\omega$ in a periodic disturbing cycle

分析区间 1, t_0 时刻系统给定功率增大,虚拟转子角频率变化率 $d\Delta\omega/dt$ 从 0 突增,在极短时间内开始回落,在 t_1 时刻减小为 0,可见虚拟转子角频率经历了从瞬间加速到逐渐减速为 0 的过程,此区间内 $d\Delta\omega/dt > 0$ 。相应地,角频率偏差 $\Delta\omega$ 从 0 开始增大,至 t_1 时刻到达振荡的最大幅值,此区间内 $\Delta\omega > 0$ 。可见区间 1 需要增加虚拟惯量以削弱虚拟转子角频率的加速程度,防止加速过快使系统产生更大的频率超调量。

分析区间 2,可知 $\Delta\omega$ 开始回落为 0,但 $\Delta\omega$ 依然大于 0;此时 $d\Delta\omega/dt < 0$,且由于 $|d\Delta\omega/dt|$ 先增大后减小,因此虚拟转子角频率同样经历了由加速到逐渐减速趋于 0 的过程,只是转子角频率加速度的方向与区间 1 相反。可见在区间 2 内,若增加虚拟惯量会减小 $|d\Delta\omega/dt|$ 的值,不利于频率的快速稳定。因此该区间内需减少虚拟惯量,使频率尽可能快地调整并趋于稳定。

区间 3 与区间 4 的情况与上述类似,也需要不同的虚拟惯量进行调整以得到最好的频率动态特性。综上分析, $\Delta\omega$ 与 $d\Delta\omega/dt$ 共同决定了虚拟惯量的选取,具体关系如表 1 所示。

表 1 虚拟转动惯量变化情况

Table 1 Condition of virtual rotor inertia

区间	$\Delta\omega$	$d\Delta\omega/dt$	$\Delta\omega(d\Delta\omega/dt)$	虚拟惯量变化情况
1	>0	>0	>0	增大
2	>0	<0	<0	减小
3	<0	<0	>0	增大
4	<0	>0	<0	减小

由表 1 可以看出,当 $\Delta\omega$ 、 $d\Delta\omega/dt$ 同号时宜增大虚拟惯量,异号时宜减小虚拟惯量,虚拟惯量的自适应算法可基于上述机理加以实现。

2.3 SA-RIDC

文献[14]详细分析了转动惯量和阻尼量各自对

频率稳定性的影响。分析指出,随着转动惯量的增大,频率的偏移峰值以及频率的初始变化率随之降低,但频率趋于稳定的调整时间随之增加,严重时甚至会出现振荡失稳的情况;而随着阻尼量的增加,频率的偏移峰值仍随之降低,但使系统到达峰值的速度更快,即增加了频率的初始变化率。可见在频率变化初期并不适宜增加阻尼量。

变换式(1)(或式(4)),可得:

$$D\Delta\omega = \Delta T - J_r \frac{d\Delta\omega}{dt} \quad (10)$$

由分析可知,当 $\Delta T - J_r(d\Delta\omega/dt)$ 一定时,阻尼 D 与频率偏移 $\Delta\omega$ 成反比。这表明阻尼影响的是系统频率的稳态偏移量,即影响频率趋于稳定的调整时间。可见频率在稳态或趋于稳态时宜增加阻尼以进一步改善频率稳定性。

在电力系统中,阻尼可用于抑制次同步振荡和低频振荡^[15-16],以欠阻尼振荡机理为代表的电力系统稳定器(PSS)已有相关应用。然而,在 VSG 领域里几乎没有对阻尼的进一步运用。

本文结合传统自适应转动惯量算法,为充分利用 VSG 阻尼的作用并进一步改善频率稳定性,提出了一种 SA-RIDC 算法,如式(11)、(12)所示。

$$J_v = \begin{cases} J_0 + \alpha_j r_{j\max} \left| \frac{d\Delta\omega}{dt} \right| & \Delta\omega \frac{d\Delta\omega}{dt} > 0 \cap \left| \frac{d\Delta\omega}{dt} \right| > T_j \\ J_0 & \Delta\omega \frac{d\Delta\omega}{dt} \leq 0 \\ J_0 & \left| \frac{d\Delta\omega}{dt} \right| \leq T_j \end{cases} \quad (11)$$

$$D = \begin{cases} D_0 & \Delta\omega \frac{d\Delta\omega}{dt} \geq 0 \\ D_0 + \alpha_d r_{d\max} |\Delta\omega| & \Delta\omega \frac{d\Delta\omega}{dt} < 0 \cap \left| \frac{d\Delta\omega}{dt} \right| > T_d \\ D_0 & \left| \frac{d\Delta\omega}{dt} \right| \leq T_d \end{cases} \quad (12)$$

其中, J_0 、 D_0 分别为虚拟惯量、虚拟阻尼稳态值; $r_{j\max}$ 、 $r_{d\max}$ 分别为虚拟惯量最大调节倍数、虚拟阻尼最大调节倍数; α_j 、 α_d 分别为自适应惯量系数、自适应阻尼系数; T_j 、 T_d 为 SA-RIDC 算法中虚拟转子角速度变化率的阈值。

$r_{j\max}$ 、 $r_{d\max}$ 可由控制系统的稳定性理论计算得出,反映了在采用该算法时 VSG 系统的临界稳定上限。限于篇幅, $r_{j\max}$ 、 $r_{d\max}$ 的理论推导不再赘述。自适应系数 α_j 、 α_d 的取值应根据系统性能调节需要自适应确定,其取值区间为 $[0, 1]$ 。

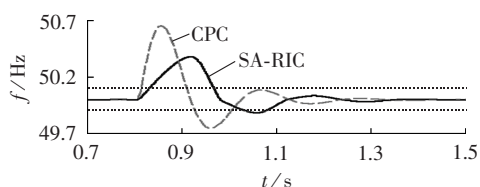
由于 $d\Delta\omega/dt$ 在区间 2、3 内远远小于区间 1,且此时 J_v 为固定值,因此系统频率相对处于稳态运行状态。由式(10)可知,在区间 2、3 内自适应改变阻尼量有助于减小频率的调整时间,从而进一步改善频率的稳定性。

算法以 $\Delta\omega(d\Delta\omega/dt)$ 为判定条件,设定阈值 M 以滤除 $d\Delta\omega/dt$ 接近 0 时产生的微小波动,避免 $\Delta\omega(d\Delta\omega/dt)$ 判定值因正负判断紊乱而失效,从而保证系统的稳定运行。在区间 1、4 内,算法控制 J_v 自适应变化,将 D 设定为稳态值 D_0 ;而在区间 2、3 内,算法控制 D 自适应变化,将 J_v 设定为稳态值 J_0 ,实现了 J_v 与 D 的交错控制。

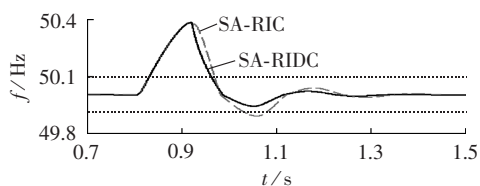
3 仿真分析

为验证所提 SA-RIDC 算法的正确性和优越性,本文利用 MATLAB/Simulink 仿真软件搭建了单台 VSG 接电阻负载的仿真算例。仿真参数如下: $f_0 = 50$ Hz, $L = 2.7$ mH, $R = 5$ Ω , $C = 30$ μ F, $U_{dc} = 650$ V, $\omega_0 = 314$ rad/s, $J_0 = 0.73$ kg·m², $D_0 = 20$, $r_{j\max} = 0.3$, $r_{d\max} = 65$, $\alpha_j = 0.667$, $\alpha_d = 0.15$, $T_j = 2.5$, $T_d = 1$ 。仿真系统运行在并网模式,初始运行时接入负荷 80 kW, 0.8 s 时降至 40 kW,模拟系统甩负荷所带来的频率稳定性问题。在相同的仿真条件下,本文对固定惯量阻尼控制^[17]CPC(Constant Parameters Control)和自适应惯量控制^[10]SA-RIC(Self-Adaptive Rotor Inertia Control)的频率稳定性进行了详细的对比。

本文采用中国华东地区有效工作频率标准(± 0.1 Hz)对所提算法的改善效果进行验证,验证结果见图 4,图中稳定范围由虚线表示。



(a) CPC 与 SA-RIC 算法的频率响应对比



(b) SA-RIC 与 SA-RIDC 算法的频率响应对比

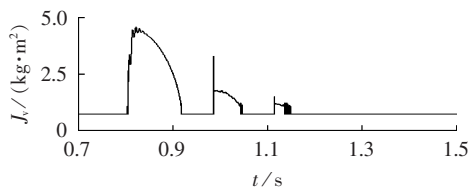
图 4 不同控制算法下系统频率响应的对比

Fig.4 Comparison of frequency responses among CPC, SA-RIC and SA-RIDC algorithms

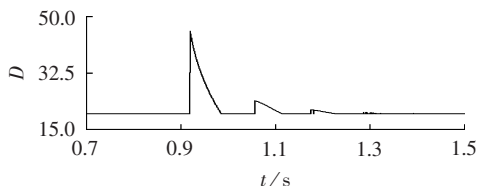
如图 4 所示,系统 0.8 s 时甩负荷 40 kW,导致有功输出在甩负荷瞬间大于有功需求,从而引起系统频率上升。图 4(a)给出了 CPC 和 SA-RIC 算法下的频率响应对比情况,可见 SA-RIC 相较 CPC 可以有效地减小频率超调量 0.27 Hz,但其调整时间相比 CPC 慢了 6.96%。图 4(b)给出了所提 SA-RIDC 算法与 SA-RIC 的频率响应对比情况。由图 4(b)可知,由于阻尼在频率变化初期不参与控制,此时两者的控制算法一致,SA-RIDC 下的频率超调量与 SA-RIC 一

样。然而,当频率从扰动峰值处开始下降时,所提算法的自适应阻尼可加速系统的动态响应时间,频率的调整速度随之加快。采用 SA-RIDC 之后,频率的调整时间约为 0.96 s,相比 SA-RIC 快了 10.7%,相比 CPC 快了 4.2%。可见自适应阻尼控制对于加速频率稳定有着明显的改善作用。

图 5 给出了 SA-RIDC 算法下的虚拟惯量 J_v 、虚拟阻尼 D 的变化情况。由图 5 可知, J_v 与 D 经历了 2 个扰动周期的交替变化过程,实现了所提算法的交替控制,使惯性量和阻尼量在互不干扰的情况下充分发挥各自作用。此外,这种交错控制也能有效避免系统失稳。



(a) 虚拟转动惯量变化曲线



(b) 虚拟阻尼变化曲线

图 5 SA-RIDC 算法下虚拟转动惯量和虚拟阻尼变化情况

Fig.5 Variation of virtual rotor inertia and virtual damping under SA-RIDC algorithm

综上所述,采用 SA-RIDC 算法后可充分利用阻尼的优势,相较于实际同步发电机的调频控制^[18],所提算法体现了其所不具有的灵活操作性。

4 结论

本文针对 DG 系统缺少转动惯量从而影响电网频率稳定性的现象,在 VSG 的 CPC 和 SA-RIC 的研究基础上,提出了一种 SA-RIDC 算法。

a. 所提算法基于 SA-RIC 的原理,结合基础力学知识,论证了虚拟转动惯量可自适应变化的可行性。

b. 所提算法探索了 VSG 虚拟阻尼量对频率稳定性的作用,并将其和自适应惯量控制相结合,从而有效提升了系统的频率稳定性。

c. 利用 MATLAB/Simulink 进行仿真实验,与 CPC 和 SA-RIC 进行对比,验证了所提算法的优越性。

d. 鉴于阻尼特性对系统功率的振荡有一定抑制作用,后期可利用所提算法进行有关功率稳定性的理论分析与仿真实验;为进一步完善所提算法,后期需进行相应的稳定性分析。

参考文献:

[1] 刘琦. 中国新能源发展研究[J]. 电网与清洁能源,2010,26(1):

1-2.

LIU Qi. Studies on China's new energy development[J]. Power System and Clean Energy,2010,26(1):1-2.

[2] 邓建玲. 能源互联网的概念及发展模式[J]. 电力自动化设备,2016,36(3):1-5.

DENG Jianling. Concept of energy internet and its development modes[J]. Electric Power Automation Equipment,2016,36(3):1-5.

[3] LASSETER R H. Microgrids[C]//Proceeding of IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. New York,USA:IEEE,2002:305-308.

[4] 魏昊焜,刘健,高慧. 分布式能源的本地电压控制策略[J]. 电力自动化设备,2016,36(9):40-45.

WEI Haokun,LIU Jian,GAO Hui. Local voltage control of distributed generations[J]. Electric Power Automation Equipment,2016,36(9):40-45.

[5] DRIESEN J,VISSCHER K. Virtual synchronous generators[C]//Power and Energy Society General Meeting. Pittsburgh,USA:IEEE,2008:1-3.

[6] 杨向真,苏建徽,丁明,等. 微电网孤岛运行时的频率控制策略[J]. 电网技术,2010,34(1):164-168.

YANG Xiangzhen,SU Jianhui,DING Ming,et al. Research on frequency control for microgrid in islanded operation[J]. Power System Technology,2010,34(1):164-168.

[7] 田雨青,郑天文,陈来军,等. 基于自适应调节的虚拟同步发电机频率控制[J]. 南方电网技术,2014,8(5):76-79.

TIAN Yuqing,ZHENG Tianwen,CHEN Laijun,et al. The frequency control of virtual synchronous generator based on adaptive adjusting[J]. Southern Power System Technology,2014,8(5):76-79.

[8] ALIPOOR J,MIURA Y,ISE T. Distributed generation grid integration using virtual synchronous generator with adaptive virtual inertia[C]//Energy Conversion Congress and Exposition. Denver, USA:IEEE,2013:4546-4552.

[9] ALIPOOR J,MIURA Y,ISE T. Power system stabilization using virtual synchronous generator with alternating moment of inertia[J]. IEEE Journal Emerging and Selected Topics in Power Electronics,2014,3(2):451-458.

[10] 程冲,杨欢,曾正,等. 虚拟同步发电机的转子惯量自适应控制方法[J]. 电力系统自动化,2015,39(10):82-89.

CHENG Chong,YANG Huan,ZENG Zheng,et al. Rotor inertia adaptive control method of VSG[J]. Automation of Electric Power Systems,2015,39(10):82-89.

[11] 吕志鹏,盛万兴,钟庆昌,等. 虚拟同步发电机及其在微电网中的应用[J]. 中国电机工程学报,2014,34(16):2591-2603.

LÜ Zhipeng,SHENG Wanxing,ZHONG Qingchang,et al. Virtual synchronous generator and its applications in microgrid[J]. Proceedings of the CSEE,2014,34(16):2591-2603.

[12] 曾正,杨欢,赵荣祥,等. 多功能并网逆变器研究综述[J]. 电力自动化设备,2012,32(8):5-15.

ZENG Zheng,YANG Huan,ZHAO Rongxiang,et al. Overview of multi-functional grid-connected inverters[J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(8):5-15.

[13] KARAPANOS V,KOTSAMPOPOULOS P,HATZIARGYRIOU N. Performance of the linear and binary algorithm of virtual synchronous generators for the emulation of rotational inertia[J]. Electric Power Systems Research,2015,123:119-127.

[14] MIGUEL A,TORRES L,LOPES L A C,et al. Self-tuning virtual synchronous machine:a control strategy for energy storage

- systems to support dynamic frequency control[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2014, 29(4): 833-840.
- [15] 胡云花,赵书强,马燕峰,等. 电力系统低频振荡和次同步振荡统一模型阻尼分析[J]. 电力自动化设备, 2005, 25(7): 6-11.
- HU Yunhua, ZHAO Shuqiang, MA Yanfeng, et al. Damping analysis of unified LFO & SSO model in power system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2005, 25(7): 6-11.
- [16] 高本峰,李忍,杨大业,等. 双馈风电机组次同步振荡阻尼特性与抑制策略[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(12): 11-20.
- GAO Benfeng, LI Ren, YANG Daye, et al. Damping characteristics and countermeasure of DFIG sub-synchronous oscillation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(12): 11-20.
- [17] ZHONG Q C, WEISS G. Synchronverters: inverters that mimic synchronous generators[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(4): 1259-1267.
- [18] 竺炜,唐颖杰,谭喜意,等. 发电机调速附加控制对系统频率稳定的作用[J]. 电力自动化设备, 2008, 28(12): 21-24.

ZHU Wei, TANG Yingjie, TAN Xiyi, et al. Effect of additional control on frequency stabilization[J]. Electric Power Automation Equipment, 2008, 28(12): 21-24.

作者简介:



李东东

李东东(1976—),男,安徽阜阳人,教授,博士,主要研究方向为电力系统分析、新能源并网和智能用电(E-mail: upwgrp@163.com);

朱钱唯(1992—),男,上海人,硕士研究生,主要研究方向为智能用电、分布式发电并网(E-mail: jay2pkf4@hotmail.com);

程云志(1979—),男,安徽桐城人,高级工程师,博士,主要研究方向为新能源建模及并网、电力系统稳定分析、零售电力市场、分布式电源、微电网等(E-mail: sjtu_yh@hotmail.com)。

Control strategy of virtual synchronous generator based on self-adaptive rotor inertia and damping combination control algorithm

LI Dongdong^{1,2}, ZHU Qianwei¹, CHENG Yunzhi³, LIU Qingfei¹,
LIN Shunfu^{1,2}, YANG Fan^{1,2}, BIAN Xiaoyan^{1,2}

(1. College of Electrical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China;

2. Shanghai Higher Institution Engineering Research Center of High Efficiency Electricity Application, Shanghai 200090, China; 3. Electric Reliability Council of Texas, Taylor 76574, USA)

Abstract: The VSG (Virtual Synchronous Generator) can support frequency stability of power grid by solving the problem of lacking inertia in distributed generation system in the inverter control field. However, the existing VSG control strategies often neglect the effect of damping. To further improve the contribution of VSG on the frequency stability, based on the traditional VSG control strategy and combined with the mechanical knowledge, the feasibility that the virtual rotor inertia of VSG can change in real-time is verified. The relationship between the frequency stability and the rotor inertia/damping coefficient is analyzed, and an SA-RIDC (Self-Adaptive Rotor Inertia and Damping Combination control) algorithm is proposed to realize the interleaving control of the virtual rotor inertia and the virtual damping. The proposed SA-RIDC algorithm is compared with the traditional constant parameters control method and the self-adaptive rotor inertia control method by MATLAB/Simulink simulation, the simulative results show that the SA-RIDC algorithm can significantly improve the frequency stability of power grid.

Key words: virtual synchronous generator; frequency stability; damping; rotor inertia; self-adaptive control

(上接第 71 页 continued from page 71)

Key techniques of transient signal generator for test of traveling wave protection

DONG Xinzhou, FENG Teng, WANG Fei

(Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: As an important part of test platform of transient traveling wave protection, the transient signal generator can transform the fault data into small analog voltage signal without distortion. The technical requirements and working principles of the transient signal generator are introduced, based on which, some key techniques are discussed and studied. The processing method of the fault data, the implementation scheme of high-speed and high-precision DA (Digital to Analog) conversion and the synchronization of the multi-channel analog output are deeply analyzed. The reliability and validity of the transient signal generator are verified by experiments.

Key words: transient traveling wave protection test platform; transient signal generator; fault data processing; digital to analog conversion; synchronous output